


21世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

# 工程爆破

主　编　段宝福




- 传承爆破物质基础，传递工程爆破方法
- 穿越传统爆破理论，迈向现代爆破技术
- 带你品鉴形形色色爆破设计与工程实例
- 让你体会云卷云舒般的爆破安全新应用





北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

# 说　明



本书电子版仅提供给高校任课教师使用，如有任课教师需要全本教材浏览或需要本书课件等相关教学资料，请联系北京大学出版社客服，微信手机同号：15600139606，扫下面二维码可直接联系。

由于教材版权所限，仅限任课教师索取，谢谢！



21世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

# 工 程 爆 破


主　编　段宝福

副主编　高文乐　逄焕东　付天光

毕卫国　李媛媛






## 内容简介

本书侧重于与爆破工程关系密切的基本概念、基本理论、基本设计以及施工方法，考虑到不同读者的需求，本书在内容上力求由浅入深、通俗易懂，理论公式推导避免过于深奥，计算实例和工程实例阐述尽量详尽。

按照循序渐进的原则，本书章节主要包括工程爆破概述、工业炸药、炸药爆炸基本理论、岩石爆破分级与凿岩机具、岩石爆破作用原理、起爆器材与起爆方法、毫秒延时爆破理论、露天爆破技术、掘进爆破技术、拆除爆破技术、爆破安全技术，共11章。

本书适合作为普通高等院校土木工程、矿井建设等专业的教材，也可作为相关专业方向研究生、教师、工程技术人员的参考书。

**图书在版编目(CIP)数据**

工程爆破/段宝福主编. —北京：北京大学出版社，2012.9
(21世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材)
ISBN 978-7-301-21302-5

Ⅰ.①工… Ⅱ.①段… Ⅲ.①爆破技术—高等学校—教材 Ⅳ.①TB41

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第227462号



**书　　名：工程爆破**
**著作责任者：**段宝福　主编
**策 划 编 辑：**姜晓楠　吴　迪
**责 任 编 辑：**姜晓楠
**标 准 书 号：**ISBN 978-7-301-21302-5/TU·0288
**出　版　者：**北京大学出版社
**地　　址：**北京市海淀区成府路205号　100871
**网　　址：**http://www.pup.cn　http://www.pup6.cn
**电　　话：**邮购部62752015　发行部62750672　编辑部62750667　出版部62754962
**电 子 邮 箱：**pup_6@163.com
**印　刷　者：**
**发　行　者：**北京大学出版社
**经　销　者：**新华书店
787毫米×1092毫米　16开本　21印张　486千字
2012年9月第1版　2012年9月第1次印刷
**定　　价：**42.00元

# 目　　录

# 第1章 工程爆破概述

随着经济建设的快速发展，工程爆破技术得到了广泛的应用，已经渗透到经济建设的众多领域，特别为中国的铁路建设、矿山开采、城市折旧等做出了重要贡献。爆破是利用炸药在空气、水、土石介质或物体中爆炸所产生的压缩、松动、破坏、抛掷及杀伤作用，达到预期目的的一门专业性很强的科技技术。其研究范围包括：炸药、爆破器材的性质和使用方法，药包在各种介质中的爆炸作用，爆破效果与危害效应的控制，各类爆破作业的组织和实施。工程爆破作为石方开挖、矿山开采等领域的一道重要工序，随着国民经济的持续发展，基础建设工程日益增多，它将会引起人们更多的关注。



## 教学目标

(1) 了解爆破器材的产生和发展历程。
(2) 掌握工程爆破的常用方法和技术。
(3) 熟悉工程爆破技术的应用现状。

## 教学要求

| 知识要点 | 能力要求 | 相关知识 |
|---|---|---|
| 爆破器材的发展 | 了解 | 黑火药、硝化甘油、雷管的发展过程 |
| 爆破方法 | 掌握 | 炮孔法、药室法、裸露药包法等 |
| 爆破技术 | 掌握 | 延时爆破、光面爆破等各种爆破技术的原理 |
| 爆破技术应用现状 | 熟悉 | 爆破理论、爆破技术的特点与发展趋势 |


引例

### 天下第一爆——震惊世界的珠海炮台山大爆破

1992年12月28日13时50分，在我国珠海炮台山，我国军人进行了一次非核大爆破，如图1-1所示。相当于半颗广岛原子弹能量的1.1169万吨炸药，将炮台山轻轻托起，举向海面。1085.2万立方米土石在爆破声中，有51.83%(大约500万立方米)被抛入大海。硝烟散尽，炮台山增胖了、变矮了……移山填海的当代“精卫”们填补了人类历史上无灾难大爆破的空白，在我国爆破史上也树起了一块里程碑。



图 1-1　珠海炮台山大爆破照片



## 1.1 爆破器材的产生与发展

爆破器材是用于爆破的各种炸药、爆破装置、火具、起爆器等的统称，主要包括炸药、雷管、导火索、导爆索、导爆管、继爆管等。

黑火药作为中华民族的四大发明之一，为人类文明发展和进步起到了巨大的推动作用。早在公元808年以前，我国炼丹家就发明了以硫磺、硝石和木炭为原料配制的黑火药。10世纪，我国开始将黑火药应用于军事，而且是世界上第一个发明爆炸性武器铁火炮的国家。大约在13世纪，黑火药经印度、阿拉伯国家传入欧洲。1627年，匈牙利用黑火药开采矿石，标志着中世纪的结束和工业革命的开始，从而揭开了工程爆破的历史。然而，工程爆破技术的快速发展和推广应用，却是在19世纪中末期随着许多新品种工业炸药的发明之后。


知识链接

### 诺贝尔与硝化甘油

阿尔佛雷德·诺贝尔(Alfred Bernhard Nobel)于1833年10月21日出生于瑞典首都斯德哥尔摩一个发明家的家庭里，只读过一年正规小学。1852年开始，他在老诺贝尔的工厂里工作，渐渐在技术上崭露头角。意大利化学家索布雷罗1847年在报告他的研究成果时曾说，用硝酸和硫酸处理甘油，得到一种黄色的油状透明液体，即硝化甘油，“这种液体可因震动而爆炸，将来能做何用途，只有将来的实验能告诉我们。”西宁教授在圣彼得堡做锤击硝化甘油发生爆炸实验给诺贝尔看，并说，如能想出切实的办法使它爆炸，它将在军事上大有用处，这引起了年轻的诺贝尔的极大兴趣。从此以后，诺贝尔对此念念不忘，决心要完成这一发明。

诺贝尔经过长期思考和实践，认识到要使硝化甘油爆炸，必须把它加热到爆炸点(170～180℃)或以重力冲击，寻求一种安全的引爆装置正是诺贝尔为自己确定的课题。1862年5月，随着一声巨响，水

沟水花四溅，地动山摇，他第一次发现了引爆硝化甘油的原理。用少量的一般火药导致硝化甘油猛烈爆炸就是诺贝尔发明的“引爆物”。为此，1863 年他在瑞典获得了硝化甘油的引爆装置——雷管的专利权，完成了他的第一项重大发明。在当时，大批量生产硝化甘油充满了风险。诺贝尔着手改进生产工艺，力求做到安全生产。由于多次的爆炸事故，诺贝尔极为悲伤，特别是 1864 年 9 月 3 日在瑞典首都斯德哥尔摩诺贝尔家住宅附近实验室的硝化甘油爆炸事故，使从事实验的 5 个人全部死于非命，其中包括诺贝尔的弟弟卢得卫，他的父亲也受了重伤。然而诺贝尔仍勇往直前，决不畏缩。他发明了用冷水管散热生产硝化甘油的冷却法，并设计了相应的机器，初步扫除了大批量生产的障碍，并很快地得到普遍应用。

诺贝尔一生都很勤奋，有着无穷的创造力，他把自己的全部精力献给了科学事业，创造了巨大的物质财富，促进了人类文明。他在去世前一年(1895 年)留下遗嘱，将价值瑞典币 30 余亿克朗的财产的一部分(共 920 万美元)作为基金，以利息(每年约 20 万美元)作为奖金，每年颁发给在物理、化学、生物、医学和文学方面有贡献的人，以及有效地促进国际亲善、废除或裁减常备军、对促进和平事业等方面有贡献的人。1968 年又增设经济学奖，受奖人不受国籍限制。这就是举世闻名的诺贝尔奖。

1799 年，英国人高尔瓦德制成了雷管；1831 年美国人毕克福特(Bickford)发明了导火索；1863 年 10 月，阿尔弗雷德·诺贝尔(Alfred Bernhard Nobel)获得发火件(雷管)的发明专利权；1867 年，瑞典化学家诺贝尔用硅藻土吸收硝化甘油(NG)制成稳定的黄色炸药—代纳迈特(Dynamite)。此后，瑞典的化学家奥尔森(Olsson)和诺宾(Norrbein)于 1867 年首次研制成功了以硝酸铵和各种燃料制成的混合炸药(硝铵炸药)，从此使工程爆破应用的最基本爆破器材得以完善，同时，也奠定了硝铵类炸药和硝化甘油类炸药相互竞争发展的基础。

进入 20 世纪，随着科学技术的进步和理论研究成果的应用，爆破器材和爆破技术也有了长足的发展。1919 年出现了以泰安为药芯的导爆索；1927 年，在瞬发电雷管的基础上诞生了秒延时电雷管；1946 年，科学家研制成功了毫秒电雷管；1950 年以后，铵油炸药(ANFO)由于起爆安全性得到了推广应用；1956 年，库克(Cook)发明了浆状炸药，开辟了硝铵炸药应用的新领域，解决了粒状硝铵炸药不适用于水孔爆破的难题，也就是硝铵炸药的防水问题；1967 年，瑞典诺贝尔炸药公司(Nitro Nobel AB)取得导爆管专利；1977 年，美国的阿特拉斯炸药公司(Atlas Power Co)生产出工业用小直径雷管敏感的乳化炸药。

电子雷管是一种可精确设定并准确实现延期发火时间的新型电雷管，具有雷管发火时刻能精确控制、延期时间可灵活设定两大技术特点。电子雷管技术的研究开发工作大约始于 20 世纪 80 年代初，到 20 世纪 80 年代中期，电子雷管产品开始进入起爆器材市场，但总体上还处于技术与产品研究开发和应用试验阶段。1993 年前后，瑞典 Dynamit Nobel 公司、南非 AEL 公司分别公布了他们的第一代电子雷管技术和相应的电子延期起爆系统，商标分别为 Dynatronic 和 ExEx 1000。在整个 20 世纪 90 年代，新型电子雷管及其起爆技术获得了较快发展，两家公司又分别于 1996 年、1998 年公布了他们的第二代技术。1998 年之后，两家公司先后开发生产了 Daveytronic 电子雷管系统、PBS 电子雷管系统和 Electrodet ® 的电子雷管起爆系统，与此同时，全球范围内相继出现了其他品牌的电子雷管系统，电子雷管技术逐渐趋于成熟和爆破工程实用化。

我国早在 20 世纪 30 年代的抗战时期，就发明和使用了硝酸铵和液体可燃物组成的炸药(铵油炸药的雏形)；新中国成立后，随着国民经济的迅速发展建立了炸药厂，才真正有了自己的工业炸药。1953 年，我国开始生产以硝酸铵为主要成分，含有梯恩梯(TNT)、

木粉等成分的粉状硝铵类炸药(简称粉状铵梯炸药)。1957 年，长沙矿山研究院等单位对粉状铵油炸药进行了比较深入的研究，1963 年以来，铵油炸药得到了全面的推广和应用。我国从 1959 年开始研制浆状炸药，20 世纪 60 年代中期在矿山爆破工程中获得应用。20 世纪 70 年代初期，我国浆状炸药发展十分迅速，浆状炸药装药车的出现，更好地满足了露天爆破作业的需要。我国从 20 世纪 70 年代后期开始研制乳化炸药，而且还独创了国外没有的乳化粉状炸药；不仅有了露天型乳化炸药混装车，而且利用水环减阻技术，发展了地下小孔径乳化装药车；乳化炸药生产技术和装药车不仅满足了国内的需要，而且出口到瑞典、蒙古、俄罗斯、越南、赞比亚等国家。乳化炸药与乳化粉状炸药的兴起和普及，使固体防水硝铵类炸药退出爆破市场。

在起爆器材方面，新中国成立初期我国只能生产导火索、火雷管和瞬发电雷管，随后便可以生产和应用毫秒、秒延期电雷管。到 20 世纪 70 年代初期，阜新矿务局十二厂生产了导爆索—继爆管毫秒延时起爆系统。20 世纪 70 年代末期，我国自行研制、生产了塑料导爆管及其配套的非电毫秒、半秒、秒延期起爆雷管，该种起爆器材的优越性，使其在露天矿山爆破、部分地下矿山爆破、土石方爆破和城市拆除爆破等工程领域中得到了广泛的应用。20 世纪 80 年代中期，根据电磁感应原理，我国研制生产了磁电雷管，该产品在油、气井爆破作业中获得了应用。为了便于爆破后的检查，20 世纪 90 年代相继出现了变色塑料导爆管。近年来，高强度导爆管雷管的开发与应用，使逐孔起爆技术得以实现。

爆破器材与技术的发展关系表明：一方面，爆破器材的发展推动了爆破技术的进步；另一方面，爆破实践又对爆破器材的发展发明提出新要求。



## 1.2 工程爆破的方法与技术

爆破是利用炸药爆炸释放的能量对介质产生破坏作用，为实现不同工程目的所采取的各种药包布置和起爆方法的一种工程技术。这种技术涉及数学、力学、物理学、化学和材料动力学、工程地质学等多种学科。

### 1.2.1 爆破方法

爆破作业的步骤是向要爆破的介质钻出的炮孔或开挖的药室或在其表面敷设炸药，放入起爆雷管，然后引爆。所以按装药方式与装药空间形状，爆破方法主要分为三大类。

1. 炮孔法

在介质内部钻出各种孔径的炮孔，经装药、放入起爆雷管、堵塞孔口、连线等工序起爆的，统称炮孔法爆破。通常将孔径 $\Phi$<50mm、孔深 $L$<3～5m 称为浅孔、孔径 $\Phi$=50～70mm、孔深 $L$<5～15m 称为中深孔，孔径 $\Phi$>80mm、孔深 $L$>15m 称为深孔。炮孔法是岩土爆破技术的基本形式。

2. 药室法

在山体内开挖坑道、药室，装入大量炸药的爆破方法有集中药室法和条形药室法。每个药室内可装入多达千吨以上的炸药，一次爆破土石方量几乎是不受限制的。药室法爆破

广泛应用于露天堑壕、基坑开挖、填港筑坝等工程，特别是在露天矿的剥离工程中，由于爆破规模大、效率高，不需要大型设备，且不受季节条件的限制，故能有效地缩短工期、降低成本。

**小知识**

我国四川攀枝花市狮子山大爆破(1971年)总装药量10162.2t，爆破1140万立方米，是继白银厂露天矿大爆破、珠海机场大爆破之后，世界上最大规模的大爆破之一。

3. 裸露药包法

裸露药包法是一种不需钻孔，直接将炸药包贴放在被爆物体表面进行爆破的方法。在破碎孤石和对爆后大块岩石作二次爆破等方面具有独特作用，仍然是常用的有效方法。

### 1.2.2 爆破技术

在上述3种爆破方法的基础上，根据各种工程目的和要求，采取不同的药包布置形式和起爆方法，可以形成许多各具特色的现代爆破技术，主要有以下几种。

1. 毫秒延时爆破

毫秒延时爆破，是20世纪40年代出现的爆破新技术。这种爆破技术利用雷管内装入适当的缓燃剂，或连接在起爆网路上的延期装置，以实现延期的时间间隔。通过不同时差组成的爆破网路，一次起爆后，可以按设计要求顺序使各炮孔内的药包依次起爆，获得良好的爆破效果。

毫秒延时爆破的特点是各药包的起爆时间相差微小，被爆破的岩块在移动过程中互相撞击，形成极其复杂的能量再分配，使岩石破碎均匀，缩短抛掷距离，减弱地震波和空气冲击波的强度，既可改善爆破质量，又能减少爆破危害。长期以来，在国民经济建设中微差爆破广泛应用于矿山、道路、水利水电、建材、城乡建设和建筑拆除工程等，具有良好的技术经济效益。

2. 光面爆破和预裂爆破

20世纪50年代末期，随着钻孔机械的发展，一种密集钻孔小装药量的爆破新技术出现了，其又称为密集钻孔爆破法、龟裂爆破法和缓冲爆破法等，光面爆破和预裂爆破是在此基础上发展起来的。采用光面爆破和预裂爆破，都可以沿设计轮廓线爆破出规整的断面轮廓，同时对周围岩体损伤很小，保护了岩体的完整性。这是由于两者的爆破作用机理相同。这种爆破技术是隧道和地下结构以及路堑和基坑开挖工程中常用的爆破技术。

在开挖区内炮孔爆破之前，首先起爆沿设计轮廓线布置的一排炮孔，爆破后将开挖区与保留区岩体切断，即在预裂炮孔之间形成一条有一定宽度的贯穿裂缝，以减弱开挖区内钻孔爆破时地震波向边坡岩体的传播并阻断向边坡外发展的裂缝，这种爆破法称为预裂爆破。

光面爆破与预裂爆破最根本的区别就在于，预裂爆破是在主爆区开挖前，在完整的岩体内预先爆破，使沿着开挖部分和不需要开挖的保留部分的边界线爆开一条裂缝，用以隔断爆破作用对保留岩体的破坏，并在工程完毕后露出这一断裂面。光面爆破则是当爆破接

近开挖边界线时，预留一圈保护层(又叫光面层)，然后对此保护层进行密集钻孔和弱装药，通过同时或稍微延迟起爆各炮孔的爆破法，在孔间产生剪切作用形成光面，减少超挖，以求得到光滑平整的坡面或巷道壁面。光面爆破又称为轮廓爆破或周边爆破。

3. 定向爆破

定向爆破是利用最小抵抗线在爆破作用中的方向性这个特点，设计时利用天然地形或人工改造后的地形，使最小抵抗线指向需要填筑的目标。这种技术已广泛地应用在水利筑坝、矿山尾矿坝和填筑路堤等工程上。它的突出优点是在极短时期内，通过一次爆破完成土石方工程挖、装、运、填等多道工序，节约大量的机械和人力，费用省、工效高；缺点是后续工程难于跟上，而且受到某些地形条件的限制。

**小知识**

新中国成立初期，我国采用定向爆破技术，3 年时间筑成了 20 多座水坝，技术上达到了国际先进水平。

4. 控制爆破

控制爆破不同于一般的工程爆破，多用于人口稠密的城乡和周围建筑物群集的地区拆除房屋、烟囱、水塔、桥梁以及厂房内部各种构筑物基座的爆破，对由爆破作用引起的各种危害效应有更加严格的要求，因此，又称拆除爆破或城市爆破。

控制爆破所要求控制的内容是：①控制爆破破坏的范围，只爆破建筑物需要拆除的部位，保留其余部分的完整性；②控制爆破后建筑物的倾倒方向和坍塌范围；③控制爆破所引起的地震动强度和对附近建筑物及其结构的震动影响，也称爆破地震效应；④控制爆破产生的碎块飞出距离、空气冲击波强度和噪声污染等。



5. 水下爆破

水下爆破是将炸药装填于海底或水下进行工程爆破的技术。如开挖港坞，疏通航道，炸除礁石，拆毁水下沉船、建筑物，以及海底排淤和码头堤坝的软基处理等类爆破，都属于水下爆破的范畴。

水下爆破方法亦类似露天爆破，也要采用裸露、钻孔和药室装药等方法实现爆破目的，一般由专业潜水员在水下进行钻孔和装药等作业，或者采用大型钻船进行水上作业。水下爆破工作范围既受水深限制，又受潮汐水流的影响，所以水下爆破施工作业比较复杂、困难。

6. 地下爆破

地下爆破不同于露天和水下爆破，通常是在一个相对狭窄的工作面上进行钻爆作业，其特点是：多打炮眼，少装药或使用低威力炸药，分散装药量，使爆破作用均匀分布其中，按设计断面有效破碎被爆岩石，最大限度地减少对围岩的破坏程度。因此，水下爆破在技术上要求比较严格。

地下爆破从技术上可分为两种：一是起掘进先导作用的掏槽爆破。其目的是在只有一个临空面的条件下，首先在工作面中央形成较小但有足够深度的槽腔，这个槽腔是整个断面掘进开挖施工中的先导。掏槽爆破的炮孔布置方法很多，必须根据地质构造、断面大小和施工机械等条件，确定良好的掏槽孔布置形式。二是起修边成形作用的周边爆破，也称刷帮爆破。除要求崩落岩块均匀、抛渣近、爆堆集中、便于清渣、不崩坏支撑等以外，还

应保证坑道开挖限界外的围岩受到最小的破坏，以减少超欠挖的数量。

地下工程的开发，需要开挖很多大空间地下结构工程，使地下爆破技术在传统矿山地下爆破的基础上迅速发展。光面、预裂爆破技术应用于地下工程，促进了锚喷网支护原理与技术的发展，爆破后的超欠挖量减少到了最低量，围岩的稳定性大为增加，使地下工程获得很大的经济效益。

## 1.3 工程爆破技术应用现状

现代工程爆破技术是一门发展迅速的跨学科的实用性专业技术，主要研究爆破理论及其岩石介质破碎、开挖和城市拆除工程等领域的应用。随着我国经济建设的发展，爆破技术在国民经济建设和国防工程中得到了广泛的应用。各种爆破新器材新技术层出不穷，极大地促进了爆破理论和技术实践的发展。

### 1.3.1 现代爆破技术的主要内容

现代爆破技术的主要内容有 4 大部分。炸药及爆炸的基本理论和岩石爆破机理是现代爆破技术发展的基本理论；工业炸药和安全实用的各种起爆器材，以及现代化施工机械，是现代爆破技术应用的物质条件；岩石爆破、建筑物拆除爆破和形形色色的特种爆破等，共同组成了现代爆破技术的丰富内容；而爆破危害监测与控制技术的进步是现代爆破技术推广应用的安全保障。

1. 爆破理论

爆破理论包括炸药及爆炸基本理论和岩石爆破机理等内容。炸药及爆炸作用的基本理论阐述了与爆破技术密切相关的炸药爆炸特性、感度及起爆传爆原理、氧平衡、爆炸功及其炸药的主要性能等。岩石爆破机理则通过研究爆破作用下岩石破坏过程、爆破漏斗形成和成组药包爆破作用等，推出装药量计算原理，并深入分析包括工程地质在内的影响爆破作用的诸因素。爆破理论模型研究成果也为爆破过程数值模拟奠定了基础。

2. 爆破的物质基础

爆破的物质基础包括爆破器材和施工机械等内容。常用工业炸药、起爆器材及其起爆系统装置，都是实施各种爆破方法的物质条件；工程爆破施工工序中，钻孔、装药、挖运及其破碎等设备机械化自动化程度的提高对改进施工条件、降低作业强度、提高工程效率和综合效益具有重要影响。

3. 爆破技术

爆破技术包括岩石爆破技术、拆除爆破技术和特种爆破技术等内容。岩石爆破技术以露天台阶爆破和地下掘进爆破为主，毫秒延时爆破、光面爆破和预裂爆破等技术是其研究的主要内容；拆除爆破技术应用日益广泛，包括各类高大高耸建(构)筑物拆除爆破、水压爆破和静态破碎等技术；异形药包爆破、爆炸加工与合成、高温高压爆破、油气井爆破、软基处理爆破等特种爆破技术，进一步拓广了爆破技术的应用范围。

1）掘进爆破

掘进爆破是地下矿山开拓、水电、交通和地下工程中岩石开挖的主要施工手段，是整个掘进工程的首要部分，爆破效果直接关系着工程质量和使用年限。

在单自由面条件下进行巷道掘进，岩石的夹制作用很大，掏槽爆破是关键。为了保护围岩，在推广新奥法施工中，光面爆破技术得到了广泛应用，实现沿着巷道轮廓线切断岩石，以求得到光滑平整的巷道壁面。

2）台阶爆破

台阶爆破是现代爆破工程应用最广的爆破技术。露天矿山开采、铁路和公路路堑工程、水电工程及基坑开挖等大规模岩石开挖工程都大量采用台阶爆破方法。台阶爆破与装运机械配合施工，机械化水平高，施工速度快、作业效率高、安全性好。随着深孔钻机等凿岩设备的不断改进和发展，深孔爆破技术越来越成熟。在边坡围岩控制技术上，毫秒延时爆破和预裂爆破等技术在台阶爆破中得到成功应用。

3）拆除爆破

拆除爆破是最近50年来迅速发展起来的一种控制爆破技术。拆除爆破具有爆区附近的环境十分复杂、爆破拆除的对象及材质各不相同、爆破堆积范围受到限制、对爆破危害的控制要求更高等特点，因此，针对不同的拆除对象必须采用不同的爆破方式。

4）水下爆破技术

水下爆破技术在水库岩塞爆破、挡水围堰拆除、港湾航道疏浚工程，以及淤泥与饱和沙土软地基爆炸处理等方面发展非常迅速，尤其是淤泥软基爆炸处理技术具有投资少、工效高和施工简便等优势，在沿海开发区建设中得到了广泛的应用。

5）特种爆破技术

特种爆破是指爆破介质和对象、爆破方法及药包结构、爆破环境或爆破目的等不同于普通爆破的特殊爆破技术。近年来金属爆炸成形、爆炸焊接、爆炸复合和切割、爆炸合成新材料等技术的应用领域越来越广。

6）爆破安全技术

爆破安全技术包括爆破施工作业中使用火工品的安全问题和爆破对周围建筑设施与环境安全影响两部分。一部分涉及爆破器材性能、适用条件、检验方法和起爆技术等问题，另一部分为爆破安全准则、爆破引起的公害及控制标准，以及防护技术和减灾技术等问题。

随着爆破技术的进步，爆破引起的包括地震、空气冲击波、飞石、噪声、毒气和粉尘等有害效应的控制技术措施，已经成为爆破设计和施工的必要部分；只要在爆破设计中采取有效的控制和防范措施，严格执行《爆破安全规程》，加强安全监测管理，即可使各种爆破有害效应降低到最低程度。

## 1.3.2 现代爆破技术特点

钻孔爆破法是现代爆破的基本方法，爆破工程的高风险性及其社会影响使得从业技术人员不仅应掌握一般的爆破方法进行爆破设计和施工，还应具备较强的安全意识、良好的心理素质和全面的管理能力。因此，现代爆破技术除具有应用涉及范围广、社会影响力大等特点外，还具有以下重要特点。

1. 强调爆破安全的重要性

全国各种爆炸事故总数占伤亡事故总数的40%。为此国家制定了相应的安全规程，如：《爆破安全规程》(GB 6722—1986)、《民用爆炸物品管理条例》、《爆破作业人员安全技术考核标准》、《大爆破安全规程》、《拆除爆破安全规程》、《乡镇露天矿爆破安全规程》等。

2003年，公安部和行业相关部门委托中国工程爆破协会重新修订了《爆破安全规程》并正式颁发执行，即《爆破安全规程》(GB 6722—2003)，同时取消了大爆破、拆除爆破、乡镇爆破相应的规程。后来又颁布了新的《爆破安全规程》(GB 6722—2011)，补充和明确了必要的术语和定义，删除了被淘汰的爆破器材品种、爆破方法和爆破工艺。

2. 要求爆破人员的素质高

我国目前从事工程爆破人员已超过120万人，其中仅有6万多人为爆破技术人员，整体素质较差、人为因素事故较多，需要加强培训和提高。

### 1.3.3 爆破技术的发展趋势



爆破工程是在保证施工过程安全的条件下完成具体爆破任务。爆破方案的可靠性必须确保万无一失，否则将会造成极其严重的后果和影响。为了适应社会发展和技术进步的要求，爆破技术正向着精确化、科学化和数字化的方向发展。

1. 爆破控制的精确化

爆破装药量计算的精确化使得药包在空间的分布上更为合理，这不仅有利于提高破碎岩石的质量，还能有效地控制爆破效应，也为后续工作创造有利条件。同时，爆破器材的发展进一步促进了起爆技术精确化。高精度雷管可使毫秒延时爆破时间间隔的控制提高到1ms数量级以内，这对于改善爆破质量和控制爆破地震效应都具有重要意义。电子数码雷管的推广使用将使起爆精确度和安全性提高到更高的水平。

2. 爆破技术的科学化

近年来爆破理论研究充分借鉴了岩石损伤理论的研究成果，甚至开始考虑岩体中天然节理裂隙对爆破效果的影响。在破岩机理研究中，除考虑爆炸冲击波和爆生气体作用外，更加关注自由面对爆破作用的影响。在爆破实践中，宽孔距小抵抗毫秒延时爆破技术，充分利用了自由面作用，通过改变起爆顺序，尽可能产生多个自由面，从而极大地改善了爆破质量，同时加大了对固体力学、工程力学等学科的引进，以及计算机模拟、数值计算、设计智能化技术和安全与量测技术等研究工作的进步，为研究岩石爆破复杂过程提供了新的技术支持。

爆破安全技术的发展和完善对于推广爆破技术的应用范围具有重要意义。非电导爆管起爆系统、高精度雷管、安全抗水炸药和乳化炸药等新型爆破器材的使用极大地提高了爆破作业的安全性；同时，降低爆破地震波、空气冲击波、飞石、粉尘及气体污染等有害效应的研究和工程实践，也有力地提高了爆破安全技术水平。

3. 爆破技术的数字化

数值计算方法的发展，经历了连续介质材料模型和非连续介质材料模型等发展阶段。

岩石爆破损伤模型因考虑了岩石内部客观存在的微裂纹及其在爆炸载荷下的损伤演化对岩石断裂和破碎的影响，能较真实地反映了岩石爆破破碎过程。但是目前的岩石爆破损伤模型普遍没有考虑爆生气体在岩石破碎中的作用。为了反应岩石中的天然节理裂隙和初始损伤等不连续影响和爆破后碎块飞散状况，人们尝试用离散元和不连续变形分析方法建立爆破数值计算模型。

计算机辅助设计(CAD)在矿山工程爆破中的应用较为普遍。露天矿生产爆破专家系统，利用模糊数学理论帮助用户进行爆破对策的选择和最优台阶高度的确定，对于某些决策系统可以给出置信水平。整个系统具有爆破对策选择、设备选择、方案选择、矿石块度尺寸分布预测、参数的敏感性研究及参数最优选择等多项输出功能，可方便地用于露天台阶爆破设计和咨询，进行爆破方案设计和爆破震动分析。

电子雷管具有数码延时控制精度高与可灵活设定两大技术特点。电子雷管的延期发火时间由微型电子芯片控制，延时控制误差达到微秒级，延期时间可在爆破现场由爆破员设定，并在现场对整个爆破系统实施编程，操作简单快捷。电子雷管除了有利于改善爆破效果，还能提高生产、储存和使用等方面的安全性。

## 本章小结

本章讲述了爆破器材的产生与发展，介绍了目前广泛使用的各种爆破方法和爆破技术，阐述了现代工程爆破技术的主要内容和特点，并对爆破技术的发展趋势作了分析。



## 习 题

**一、名词解释**

爆破，爆破器材，炮孔法爆破，裸露药包法爆破，药室法爆破，光面爆破，预裂爆破

**二、填空题**

1. 按装药方式与装药空间形状，爆破方法主要分为________、________和________。
2. 爆破安全技术包括________安全问题和________安全影响两部分。
3. 地下爆破从技术上可分为两种：一是________，二是________。
4. 定向爆破设计时利用天然地形或人工改造后的地形，使________指向需要填筑的目标。

**三、简答题**

1. 工程爆破方法主要分为哪几类？简述其各自的特点。
2. 简述光面爆破与预裂爆破的区别和联系。
3. 定向爆破的优点和缺点是什么？
4. 控制爆破所要求的控制内容是什么？
5. 现代爆破技术的主要内容包括哪些？
6. 简述现代爆破技术的特点。
7. 简述爆破技术的发展趋势。

# 第2章
# 工业炸药

18世纪前，黑火药一直都是世界上唯一的爆炸材料。18世纪以后，化学作为一门科学有了迅速的发展，从而为炸药原料的来源和合成及制备提供了条件。许多化学家致力于研制性能更好、威力更大的爆炸材料。炸药也越来越广泛的应用于各个方面，尤其是工业生产中。

工业炸药又称民用炸药，是以氧化剂和可燃剂为主体，按照氧平衡原理构成的爆炸性混合物，属于非理想炸药。工业炸药具有成本低廉、制造简单、应用可靠等特点，因而广泛应用于煤矿冶金、石油地质、交通水电、林业建筑、金属加工和控制爆破等各个领域。随着各国经济建设的不断发展，工业炸药的需求持续增长，相应地，炸药品种和产量也得到了迅速发展。



## 教学目标

(1) 理解并熟知炸药的几种分类方法及其各自的分类。
(2) 了解工业常用炸药和它们的分类，着重掌握硝铵类炸药的分类及其性能特征。
(3) 结合煤矿工业，了解煤矿许用炸药的特点及其分类和性能。

## 教学要求

| 知识要点 | 能力要求 | 相关知识 |
|---|---|---|
| 炸药分类 | 掌握 | 炸药的分类方法及常见分类 |
| 工业常用炸药 | 熟悉 | 炸药的三大种类；起爆药，单质猛炸药和混合猛炸药的用途、性能及各自典型的代表 |
| 硝铵类炸药 | 熟悉 | 硝铵类炸药分类及其性能 |
| 煤矿许用炸药 | 了解 | 煤炭许用炸药分类、性能及适用条件 |


引例

国内工业炸药现状

随着我国国民经济的持续发展，工业炸药在经济建设领域的应用更为广泛，尤其在矿山和能源开采、交通、水利、城市建设等方面，其使用量大幅提高，近年来工业炸药生产量逐步提高(表2-1)。

表 2-1　近年来我国工业炸药及乳化炸药产量一览

| 年份 | 工业炸药/万吨 | 乳化炸药/万吨 | 乳化炸药占工业炸药的比重/% |
|---|---|---|---|
| 2008 | 291 | 148 | 53 |
| 2007 | 286 | 136 | 47 |
| 2006 | 261 | 109 | 42 |
| 2005 | 240 | 88 | 37 |
| 2004 | 216 | 69 | 32 |
| 2003 | 185 | 52 | 28 |
| 2002 | 156 | 39 | 25 |
| 2001 | 137 | 31 | 23 |

截至 2009 年，国内工业炸药生产点(发号)有 198 家，而炸药生产线有 482 条，总生产能力 450 万吨/年。从各生产点的产能来看，6000 吨/年以下的 52 家；1 万吨/年以下的 95 家，1 万吨/年以上的 51 家；从工艺特点来分析，采用连续化、自动化生产技术的生产线占有 50%以上。

工业炸药作为爆炸危险品，在生产、运输、使用过程中曾发生多次重大安全事故(表 2-2)。近两年来，我国工业炸药领域采取了先进的生产技术和安全保障技术，以及严格的管理和积极的防范措施，安全事故大为减少。

表 2-2　近年来工业炸药生产、运输、使用过程中重大安全事故

| 序号 | 事例 | 死亡人数/人 |
|---|---|---|
| 1 | 福建某厂乳化炸药生产过程因乳化器桨叶断裂引起爆炸 | 7 |
| 2 | 湖南某厂乳化炸药生产中因人为引爆 | 61 |
| 3 | 山东平邑某厂乳化炸药因乳化器结构原因及断料引起爆炸 | 3 |
| 4 | 非洲赞比亚某乳化炸药生产线生产过程中发生爆炸 | 47 |
| 5 | 河北某厂乳化炸药乳化器检修过程断料干摩擦引起爆炸 | 13 |
| 6 | 安徽某厂乳化炸药生产过程中发生爆炸 | 15 |
| 7 | 重庆某厂乳化炸药生产过程中发生爆炸 | 19 |
| 8 | 山东招远某厂粉状炸药生产过程中发生爆炸 | 15 |
| 9 | 宁夏某爆破现场爆破过程中发生事故 | 22 |



## 2.1 炸药的分类

工业炸药是指用于矿山、道路、水利、建材等国民经济建设部门的民用炸药。一般来说，炸药是一种在一定外能作用下可能发生高速化学反应并释放出大量热量和生成大量气体的物质。矿山爆破中最早使用的炸药是黑火药。在 19 世纪中期，诺贝尔发明了以硝化甘油为主的混合炸药，从而取代了黑火药。硝化甘油炸药威力大，但成本高，安全性相对

较差。20世纪初，以硝酸铵为主的混合炸药出现后，其性能及安全性更适合于矿山生产及各类工程爆破，因此得到了广泛应用，并形成了各种品种、系列的炸药。

**基础知识**

工业炸药应满足以下基本要求。

(1) 具有足够的爆炸能量。

(2) 具有合适的感度，保证使用引爆体直接引爆。

(3) 具有一定的化学安定性。

(4) 爆炸生成的有毒气体少。

(5) 原材料来源广，成本低廉，便于生产加工。

工业炸药一般有按化学成分、组成成分、作用特性与用途、使用条件和物理状态5种分类法。

1. 工业炸药按主要化学成分分类

(1) 硝铵类炸药。以硝酸铵为主要成分，加上适量的可燃剂、敏化剂及其他附加剂的炸药。

(2) 硝化甘油类炸药。以硝化甘油或硝化甘油与硝化乙二醇混合物为主要爆炸成分的混合炸药均属此类。

(3) 芳香族硝基化合物类炸药。凡是苯及其同系物，如甲苯、二甲苯的硝基化合物以及苯胺、苯酚和萘的硝基化合物均属此类。例如：梯恩梯、二硝基甲苯磺酸钠等。

(4) 液氧炸药。它是由液态氧和固态可燃性吸收剂组成的爆炸混合物。

2. 工业炸药按组成成分分类

(1) 单质炸药。化学成分为单一化合物的炸药。

(2) 混合炸药。由多种爆炸成分和非爆炸成分混合而成的炸药。

3. 工业炸药按作用特性与用途分类

(1) 起爆药。起爆药是一种对外能作用特别敏感的炸药。当其受到较小的外能(如机械、热、火焰)作用时，均易激发而产生爆轰，且反应速度极快，故工业上常用它来制造雷管，最常用的有二硝基重氮酚和氮化铅。

(2) 猛炸药。与起爆药相比，猛炸药的敏感度较低，通常要在一定的起爆源(如雷管)作用下才会发生爆轰。猛炸药具有爆炸威力大、爆炸性能好的特点，因此是用于爆破作业的主要炸药种类。根据猛炸药的组成，又可分为单质猛炸药和混合炸药。

(3) 发射药。如常用的黑火药，其特点是对火焰极敏感，可在敞开的环境中燃烧，而在密闭条件下则会发生爆炸，但爆炸威力较弱，工业上主要用于制造导火索和矿用火箭弹。黑火药吸湿性强，吸水后敏感度会大大降低。

4. 工业炸药按使用条件分类

(1) 第一类——安全炸药，准许在一切地下和露天爆破工程中使用的炸药，包括含瓦斯和矿尘爆炸危险的工作面，又叫煤矿许用炸药。

(2) 第二类——非安全炸药，准许在地下和露天爆破工程中使用的炸药，但不包括有瓦斯和矿尘爆炸危险的工作面，又叫岩石炸药。

(3) 第三类——非安全炸药，只准许在露天爆破工程中使用的炸药，又叫露天炸药。

第一类和第二类炸药每千克炸药爆炸时所产生的有毒气体不能超过安全规程所允许的量。同时，第一类炸药爆炸时还必须保证不会引起瓦斯或矿尘爆炸。

5. 工业炸药按物理状态分类

工业炸药按物理状态有固态、塑性、液态、气体炸药之分。

## 2.2 工业常用炸药

1. 起爆药

起爆药的特点是，敏感度一般都很高，在很小的外界能量(如火焰、摩擦、撞击等)激发下就能发生爆炸，主要用于制作雷管。雷管中的起爆药用量很少。

工业雷管中的起爆药有雷汞($Hg(CNO)_2$)、叠氮化铅($Pb(N_3)_2$)和二硝基重氮酚(DDNP)等，都是单质炸药。

2. 单质猛炸药

单质猛炸药是指化学成分为单一化合物的高威力炸药。这类炸药对外能的敏感度比起爆药低，需要起爆药的爆炸能来起爆，且爆炸威力大，爆炸性能好，常用于做雷管的加强药、导爆索和导爆管的芯药、起爆弹等起爆器材，以及混合炸药的敏化剂等。

单质猛炸药按化合物成分有以下种类。

(1) 硝基化合物类：分子结构中含硝基($-NO_2$)与碳(C)相连，如梯恩梯(三硝基甲苯)、苦味酸。

(2) 硝酸酯类：分子结构中含硝酰基($-O-NO_2$)与碳(C)相连，如硝化甘油(三硝基丙三酯)、泰安(四硝化戊四醇)。

(3) 硝胺类：分子结构中含($=N-NO_2$)与C相连，如黑索金(环三次甲基三硝胺)。

(4) 硝酸盐类：如硝酸铵($NH_4NO_3$)。




工业常用单质猛炸药有梯恩梯、黑索金(RDX)、太安(PETN)、硝化甘油(NG)。

(1) 梯恩梯(TNT)，即三硝基甲苯$CH_3C_6H_2(NO_2)_3$，纯净的TNT为无色针状结晶，熔点为80.75℃，工业生产的粉状TNT为浅黄色鳞片状晶体，其液态密度为1.465g/cm$^3$，铸装密度为1.55～1.56g/cm$^3$，即熔融时体积约膨胀12%；吸湿性弱，几乎不溶于水；热安定性好，常温下不分解，遇火能燃烧，密闭条件下燃烧或大量燃烧时，很快转为爆炸。梯恩梯的机械感度较低，但若混入细砂类硬质掺合物则容易引爆。梯恩梯的做功能力为285～300ml，猛度为19.9mm，爆速为6850m/s，密度为1.595g/cm$^3$。

用途：工业上多用梯恩梯作为硝铵类炸药的敏化剂。

(2) 黑索金(RDX)，即环三次甲基三硝胺$(CH_2)_3(NNO_2)_3$，白色晶体，熔点为204.5℃，爆发点230℃，不吸湿，几乎不溶于水，热安定性好，其机械感度比TNT高。黑索金的做功能力为550mL，猛度为16mm，爆速为8300m/s，爆热值为5350kJ/kg。

用途：由于其爆炸威力大、爆速大，工业上多用作雷管的加强药和导爆索药芯等。

(3) 太安(PETN)，即四硝化戊四醇 $C(CH_2NO_3)_4$，白色晶体，熔点 140.5 ℃，爆发点 225 ℃。太安的做功能力为 500mL，猛度为 15mm，爆速为 8400m/s。

用途：太安的爆炸性能与黑索金相似，用途也相同。

(4) 硝化甘油(NG)，即三硝基丙三酯 $C_3H_5(ONO_2)_3$，系无色或微带黄色的油状液体，不溶于水，在水中不失去爆炸性。做功能力 500ml，猛度 23mm。硝化甘油有毒，应避免皮肤接触，机械感度高，爆发点 200℃，在 50 ℃时开始挥发，13.2℃时冻结，此时极为敏感。

3. 混合猛炸药

混合猛炸药是工程爆破中用量最大的炸药，它由爆炸性物质和非爆炸性物质按一定配比混制而成。大多数工业炸药都属于混合炸药。

1) 黑火药

黑火药是由硝酸钾、硫黄和木炭组成的混合物，是在适当的外界能量作用下，自身能进行迅速而有规律的燃烧，同时生成大量高温燃气的物质。黑火药燃烧时，发生如下化学反应。

$$2KNO_3+S+3C=K_2S+N_2\uparrow+3CO_2\uparrow$$

硝酸钾分解放出的氧气使木炭和硫磺剧烈燃烧，瞬间产生大量的热和氮气、二氧化碳等气体。由于体积急剧膨胀，压力猛烈增大，于是将发生爆炸。

2) 硝化甘油类炸药(Dynamite)

硝化甘油发明以后，诺贝尔(Nobel)在一个偶然的机会把硝化甘油溅到包装用的硅藻土里，发现硅藻土能吸收大约 3 倍于自身质量的硝化甘油。于是他将 75%硝化甘油和 25%硅藻土混合物作为爆炸剂投放市场，这就是第一代 Dynamite，后来用活性吸附剂硝化棉取代硅藻土制得爆胶，并掺入硝酸铵等氧化剂及其他添加剂，发展成沿用至今的胶质炸药。由于胶质 Dynamite 容易起爆、传爆稳定和爆炸威力高等特点，它迅速取代了黑火药而获得广泛应用。

3) 铵油炸药

铵油炸药属于一种无梯炸药，主要由硝酸铵和燃料组成的一种粉状或粒状爆炸性混合物，主要适用于露天及无沼气和矿尘爆炸危险的爆破工程。产品包括：粉状铵油炸药、多孔粒状铵油炸药、重铵油炸药等。

粉状铵油炸药指以粉状硝酸铵为主要成分，与柴油和木粉(或不加木粉)制成的铵油炸药。多孔粒状铵油炸药指由多孔粒状硝酸铵和柴油制成的铵油炸药。重铵油炸药指在铵油炸药中加入乳胶体的铵油炸药，具有密度大，体积威力大和抗水性好等优点，适用于含水炮孔中使用，又称乳化铵油炸药。

4) 铵松蜡、铵沥蜡炸药

铵松蜡、铵沥蜡炸药的主要成分有硝酸铵、松香、石蜡、沥青。爆炸性能接近 2 号岩石硝铵炸药，防潮抗水性能好，但有毒气体生成量高，适用于中硬岩石爆破。

5) 含水硝铵炸药

水是这种炸药的重要组成成分之一，从观念上、理论上都可以说是一次重大突破，实现了以水抗水的功能。1956 年，其同铵油炸药同时发展起来，共有 3 代产品：浆状炸药、水胶炸药、乳化炸药。

（1）浆状炸药。基本组成有3部分：氧化剂水溶液、敏化剂和可燃剂、胶凝剂。其特点有抗水性强、适用于水孔爆破、炸药密度大、感度低，使用安全、储存期短。

（2）水胶炸药。属第二代含水炸药，与浆状炸药的不同点包括：①使用了水溶性的敏化剂（硝酸甲胺）取代或部分取代了猛炸药；②采用了化学交联技术，呈凝胶状态。

（3）乳化炸药。是借助乳化剂的作用，使氧化剂盐类水溶液的微滴，均匀分散在含有分散气泡或空心玻璃微珠等多孔物质的油相连续介质中，形成一种油包水型（W/O）的乳胶状含水炸药，是20世纪70年代末产生的第三代新型含水工业炸药。其组成中包含3种物相、4种基本成分（氧化剂水溶液、燃料油、乳化剂、敏化剂）。

乳化炸药的主要性能及优缺点：①爆炸性能好，爆速高；②抗水性能好；③安全性能好，机械感度低，爆轰感度高；④密度可调范围较宽；⑤猛度高；⑥环境污染小，不含TNT。

6）煤矿许用炸药

煤炭生产过程中，工作面不断揭露煤岩层，空气中会不同程度地存在瓦斯和煤尘。在这种工作面从事爆破作业时，必须使用经主管部门批准，符合国家安全规程规定、允许在有瓦斯和（或）煤尘爆炸危险的煤矿井下工作面或工作地点使用的炸药。

炸药爆炸可能会引起瓦斯、煤尘的燃烧或爆炸，其主要原因有爆生气体产物直接作用、灼热固体颗粒作用、形成的空气冲击波作用。

煤矿许用炸药的主要种类有硝铵系列煤矿炸药（包括粉状的、含水类的）、离子交换炸药、被筒炸药、当量炸药。

**小知识**

离子交换炸药是由氯化铵和硝酸钾（或硝酸钠）的等效混合物组成，以3%左右的硝化甘油凝胶为敏化剂的一种炸药；被筒炸药是用爆轰性能较好的煤矿硝铵炸药做药芯，外面包裹一个消焰剂做的安全被筒的一种复合炸药；当量炸药是盐量分布均匀，安全性与被筒炸药相当的一种炸药。



## 2.3 硝铵类炸药

在隧道开挖、矿床开采和土石方工程中，矿石和岩石强度高一般都比较坚硬，且整体性强，直接依靠人力或机械开挖是很难进行的，使用爆破则是一种行之有效的方法。硝铵炸药是当前工程爆破领域使用的主要材料，存在两大类别：粉状硝铵炸药和含水硝铵炸药。

1．粉状硝铵炸药

常用的粉状硝铵炸药有铵油炸药、铵松蜡炸药等，由于其组成成分不同，性能指标和适用条件也各不相同。

1）铵油炸药

（1）铵油炸药成分。铵油炸药是一种无梯炸药。最广泛使用的一种铵油炸药是含粒状硝酸铵94%和轻柴油6%的氧平衡混合物。为了减少炸药的结块现象，也可适量加入木粉作为疏松剂。最适合做铵油炸药用的粒状硝酸铵，密度范围为1.40～1.50$g/cm^3$。人们常使用两个品种的硝酸铵，一种是细粉状结晶的硝酸铵，另一种是多孔粒状硝酸铵。后者表面充满空穴，吸油率较高，松散性和流动性都比较好，不易结块，适用于机械化装药，多

用于露天深孔爆破；前者则多用于地下矿山。

(2) 铵油炸药主要特点。

① 成分简单，原料来源充足，成本低，制造使用安全，一般矿山均可自己制造，甚至可在露天爆破工地现场拌制，适合于综合机械化钻爆作业。

② 感度低，起爆比较困难。采用轮辗机热加工且加工细致、颗粒较细、拌合均匀的细粉状铵油炸药可由普通雷管直接起爆。采用冷加工，且加工粗糙、颗粒较粗、拌合较差的粗粉状铵油炸药，普通雷管不能直接起爆，需辅助以普通炸药制成的起爆药包起爆，在爆炸威力方面也低于铵梯炸药。

③ 吸潮及固结性较强。由于硝酸铵的多晶性，在温度变化和吸潮的过程中，变晶成块，其爆炸性能严重恶化，感度更低，故最好现拌现用，不宜长期储存。容许的储存期一般为 15d(潮湿天气为 7d)。

铵油炸药在炮孔中的散装密度取决于混合物中粒状硝酸铵自身的密度和粒度大小，一般约为 0.78～0.85g/cm$^3$。

(3) 铵油炸药加工工艺流程。铵油炸药的性能不仅取决于它的配比，而且也取决于生产工艺。生产铵油炸药应力求做到“干、细、匀”，即炸药的水分含量要低、粒度要细、混合要均匀，以保证质量。根据所用原料以及加工条件的不同，铵油炸药生产工艺流程亦不同。细粉状铵油炸药生产工艺流程如图 2-1 所示。

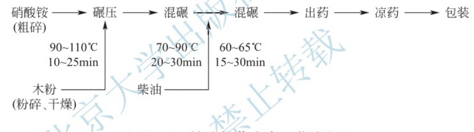





**图 2-1 铵油炸药生产工艺流程图**

在生产铵油炸药过程中，不论采用哪种工艺，都必须特别注意防火。这是因为铵油炸药易燃，且燃着后不易扑灭。铵油炸药燃烧时产生大量有毒气体，密闭条件下还可转变为爆炸。

铵梯炸药和铵油炸药的优点虽然非常突出，然而所含硝酸铵易溶于水或从空气中吸潮而失效，因此限制了这两类炸药的使用范围。在研制抗水硝铵类炸药方面，当前国内外主要采取两个不同的途径。其一是用憎水性物质包裹硝酸铵颗粒，其二是用溶于水的胶凝物来制造抗水性强的含水炸药。

2) 铵松蜡、铵沥蜡炸药

铵松蜡炸药由硝酸铵、木粉、松香和石蜡混制而成。它有利于克服铵梯和铵油炸药吸湿性强、保存期短的不足，其原料来源也较符合我国资源特点。总之，它除了保持铵油炸药的优点外，还具有抗水性能良好、保存期长，性能指标也达到了 2 号岩石炸药标准等优点。铵松蜡炸药之所以具有良好的防水性能，主要是因为以下几个原因。

(1) 松香、石蜡都是憎水物质，可形成粉末状防水网，防止硝酸铵吸水。

(2) 石蜡还可形成一层憎水薄膜，阻止水分进入。

(3) 含有柴油的铵松蜡炸药中，松香与柴油可以共同组成油膜，也能防止水分进入。

除铵松蜡炸药外，还有铵沥炸药、铵沥蜡炸药等。这些炸药的缺点是，由于石蜡和松

香的燃点低，不能用于有瓦斯和矿尘爆炸危险的地下矿山；另外，这类炸药的毒气生成量也较大。

2. 含水硝铵炸药

含水硝铵炸药包括浆状炸药、水胶炸药、乳化炸药等。它们的共同特点是将硝酸铵或硝酸钾、硝酸钠溶解于水后，成为硝酸盐的水溶液，当其达到饱和时便不再吸收水分。依据这一原理制成的防水炸药，其防水机理可简单理解为“以水抗水”。

1）浆状炸药

浆状炸药是美国的库克和加拿大的法曼于1956年合作发明，并由埃列克化学公司正式投产的一种新型抗水炸药，在世界炸药史上被誉为“第三代炸药”。简单地说，浆状炸药是由氧化剂水溶液、敏化剂和胶凝剂等基本成分组成的悬浮状的饱和水胶混合物，其外观呈半流动胶浆体，故称为浆状炸药。其成分一般为以下几种。

（1）氧化剂水溶液。浆状炸药的氧化剂水溶液主要是硝酸铵或硝酸钾、硝酸钠的混合物，它的含量占炸药总量的65％～85％，含水量占10％～20％。水作为连续相而存在，其主要作用是有以下几个。

① 使硝酸铵等固体成分成为饱和溶液，不再吸水。

② 使硝酸铵等固体成分溶解或悬浮，以增加炸药的可塑性和增大炸药的密度。

③ 使炸药成为细、密、匀的连续相，各成分紧密接触，提高炸药的威力。但是，必须注意的是水为钝感物质，由于水分增加，炸药的敏感度将有所降低。

（2）敏化剂。浆状炸药敏化剂按成分不同可分为以下4类。

① 猛炸药的敏化剂，常用的有梯恩梯、黑索金、硝化甘油等，含量为6％～20％。

② 金属粉末敏化剂，如铝粉、镁粉、硅铁粉等，含量为2％～15％。

③ 气泡敏化剂，如亚硝酸钠，加入量为0.1％～0.5％。

④ 燃料性敏化剂，如柴油、硫磺等，含量为1％～5％。

（3）胶凝剂。它是浆状炸药的关键成分，可使氧化剂水溶液变为胶体液，并使各物态不同的成分胶结在一起，使其中未溶解的硝酸盐类颗粒、敏化剂颗粒等悬浮于其中，又可使浆状炸药胶凝、稠化，提高其抗水性能。胶凝剂有两类，一类是植物胶，主要是白笈、玉竹、田菁胶、槐豆胶、皂胶和胡里仁粉等；另一类是工业胶，主要为聚丙烯酰胺，俗称“三号剂”：植物胶用量约为2％～2.4％，聚丙烯酰胺用量约为1％～3％。

（4）交联剂。其又称助胶剂，交联剂的作用是使浆状炸药进一步稠化以提高抗水性能，常用硼砂、重铬酸钾等，含量为1％～3％。使用交联剂，可以相对减少胶凝剂的用量。

（5）表面活性剂。常用十二烷基苯磺酸钠或十二烷基磺酸钠，它的作用是增加塑性，提高其耐冻能力；其次是能吸附铝粉等金属颗粒，防止与水反应生成氢而逸出。

（6）起泡剂。常用亚硝酸钠，其作用是加入后能产生氮气化物和二氧化碳，形成气泡，以便在起爆时产生绝热压缩，增加炸药爆轰感度。这种气泡又叫敏化气泡。采用起泡剂可以相对减少敏化剂梯恩梯的用量。另外，泡沫、多孔含碳材料等也可用作起泡剂。

（7）安定剂。加入适量的尿素等，可提高胶凝剂的粘附性和炸药的柔软性，以防止炸药变质。

（8）防冻剂。加入乙二醇等可使冰点降低，增加炸药耐冻性。

浆状炸药敏感度较低，不能用普通8号雷管起爆，而需要用起爆药包来起爆。

几种国产浆状炸药的组分、性能见表 2－3。

**表 2－3　国产浆状炸药的组成和性能**

| 炸药品种 | | 4＃浆状炸药 | 5＃浆状炸药 | 槐 1＃浆状炸药 | 槐 2＃浆状炸药 | 皂 1＃抗冻浆状炸药 | 田菁 10＃浆状炸药 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 成分/% | 硝酸铵 | 60.2 | 70.2～71.5 | 67.9 | 54.0 | 45.0 | 57.5 |
| | 硝酸钾 | — | — | — | 10.0 | — | — |
| | 硝酸钠 | — | — | 10.0 | — | 10.0 | 10.0 |
| | 梯恩梯 | 17.5 | 5.0 | — | 10.0 | 17.3 | 10.0 |
| | 水 | 16 | 15.0 | 9 | 14.0 | 15 | 11.2 |
| | 柴油 | — | 4.0 | 3.5 | 2.5 | — | 2.0 |
| | 凝胶剂① | （白）2.0 | （白）2.4 | （槐）0.6 | （槐）0.5 | （皂）0.7 | 田菁胶 0.7 |
| | 亚硝酸钠 | — | 1.0 | 0.5 | 0.5 | — | — |
| | 交联剂 | 硼砂 1.3 | 硼砂 1.4 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 1.0 发泡溶液 |
| | 表面活性剂 | — | 1.0 | 2.5 | 2.5 | 1.0 | 3.0 |
| | 硫磺粉 | — | — | 4.0 | 4.0 | — | 2.0 |
| | 乙二醇 | — | — | — | — | 3.0 | — |
| | 尿素 | 3 | — | — | — | 3.0 | 3.0 |
| 性能 | 密度/($g \cdot cm^{-3}$) | 1.4～1.5 | 1.15～1.24 | 1.1～1.2 | 1.1～1.2 | 1.17～1.27 | 1.25～1.31 |
| | 爆速/($km \cdot s^{-1}$) | 4.4～5.6 | 4.5～5.6 | 3.2～3.5 | 3.9～4.6 | 5.6 | 4.5～5.0 |
| | 临界直径/mm | 96 | ≤45 | — | 96 | ≤78 | 70～80 |

注：① 白芨粉、槐豆胶、皂角粉、田菁胶。



浆状炸药的优点是炸药密度高、可塑性较好、抗水性强，适于有水炮孔爆破，使用安全。其缺点是感度低，不能用普通雷管起爆，需采用专门起爆体(弹)加强起爆，理化安定性较差，在严寒冬季露天使用受到影响。

2）水胶炸药

水胶炸药实际上是浆状炸药改进后的新品种，故在国外将其列为浆状炸药。它与浆状炸药的不同之处在于其主要使用的是水溶性敏化剂，这样就使得氧化剂的耦合状况大为改善，从而获得更好的爆炸性能。水胶炸药的成分如下。

(1) 氧化剂，主要是硝酸铵和硝酸钠。硝酸铵可用粉状也可用粒状。在生产水胶炸药时，将部分硝酸铵溶解成 75%的水溶液，另一部分可直接加入固体硝酸铵。

(2) 敏化剂，常用甲基胺硝酸盐(简称 MANN)的水溶液。甲基胺硝酸盐比硝酸铵更易吸湿，易溶于水，本身又是一种单质炸药。在水胶炸药中，它既是敏化剂又是可燃剂。甲基胺硝酸盐不含水时可直接用雷管起爆，但当其为温度小于 95℃、浓度低于 86%的水溶液时，不能用 8 号雷管起爆。因此，可用不同含量的甲基胺硝酸盐制成不同感度的水胶炸药。其原料来源广泛，应用较广。

(3) 粘胶剂。水胶炸药具有良好的粘胶效果，因而比浆状炸药具有更好的抗水性能和

爆炸威力。国内多用田菁胶、槐豆胶，国外多用古尔胶作粘胶剂。

几种国产水胶炸药的组成及性能见表 2－4。

表 2－4　几种国产水胶炸药的组成及性能

| 炸药系列或型号 | | SHJ—K 型 | W—20 型 | 1 号 | 3 号 |
|---|---|---|---|---|---|
| 组成/% | 硝酸铵(钠) | 53～58 | 71～75 | 55～75 | 48～63 |
| | 水 | 11～12 | 5～6.5 | 8～12 | 8～12 |
| | 硝酸甲胺 | 25～30 | 12.9～13.5 | 30～40 | 25～30 |
| | 铝粉或柴油 | 铝粉 4～2 | 柴油 2.5～3 | — | — |
| | 凝胶剂 | 2 | 0.6～0.7 | — | 0.8～1.2 |
| | 交联剂 | 2 | 0.03～0.09 | — | 0.05～1.1 |
| | 密度控制剂 | — | 0.3～0.5 | 0.4～0.8 | — |
| | 氯酸钾 | — | 3～4 | — | 0.1～1.2 |
| | 延时剂 | — | — | — | 0.02～0.06 |
| | 稳定剂 | — | — | — | 0.1～0.4 |
| 性能 | 爆速/($km \cdot s^{-1}$) | 3.5～3.9 | 4.1～4.6 | 3.5～4.6 | 3.6～4.4 |
| | 猛度/mm | >15 | 16～18 | 14～15 | 12～20 |
| | 殉爆距离/cm | >8 | 6～9 | 7 | 12～25 |
| | 临界直径/mm | — | 12～16 | 12 | — |
| | 爆力/ml | >340 | 350 | — | 330 |
| | 爆热/($J \cdot g^{-1}$) | 1100 | 1192 | 1121 | — |
| | 储存期/月 | 6 | 3 | 12 | 12 |



水胶炸药的优点是：抗水性强、感度较高，可用 8 号雷管起爆，并且有较好的爆炸性能，可塑件好，使用安全；缺点是成本较高，爆炸后生成的有毒气体比 2 号岩石炸药多。

3）乳化炸药

乳化炸药是美国于 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型炸药，我国在 20 世纪 70 年代末期开始生产。它具有威力高、感度高、抗水性良好的特点，被誉为“第四代”炸药。它不同于水包油型的浆状炸药和水胶炸药，是以油为连续相的油包水型的乳胶体。它不含爆炸性的敏化剂，也不含胶凝剂。此种炸药中的乳化剂可使氧化剂水溶液(水相或内相)微细的液滴均匀地分散在含有气泡的近似油状物质的连续介质(油相或外相)中，使炸药形成一灰白色或浅黄色的油包水型特殊内部结构的乳胶体，故称乳化炸药。

(1) 乳化炸药的成分如下所示。

① 氧化剂水溶液，即硝酸盐水溶液，呈细小水滴的形式存在，其含量占 55%～80%，含水量为 10%～20%

② 可燃剂，一般由柴油和石蜡组成，其含量约为 1%～8%，水相分散在油相之中，形成不能流动的稳定的油包水型乳胶体。

③ 发泡剂，可用亚硝酸钠、空心微玻璃球、珍珠岩粉或其他多孔性材料。发泡剂可提高炸药的感度，加入量约为 0.05%～0.1%。

④ 乳化剂。这是乳化炸药生产工艺中的关键成分，其含量约为 0.5%～0.6%。本来油与水是不相溶的，但乳化剂是一种表面活性剂，可用来降低油和水的表面张力，使它们互相紧密吸附，形成油包水型乳化物。这种油包水型微粒的粒径约为 2μm 左右，因而极为有利于爆轰反应。

乳化剂多为脂肪族化合物，它可以是一种化合物，也可以是多种物质的混合物，常用山梨糖醇单月桂酸酯、山梨糖醇酐单油酸盐等。国产乳化炸药大多采用斯本－80 作乳化剂，此外还可加入一些其他物质，如铝粉、硫磺等。

(2) 乳化炸药的性能。乳化炸药的性能不但同它的组成配比有关，而且也同它的生产工艺特别是乳化技术有关。乳化炸药的主要性能特点如下。

① 抗水性强。在常温下浸泡在水中 7 天后，炸药的性能不会产生明显变化，仍可用 8 号雷管起爆，故可代替硝化甘油炸药在水下使用。

② 爆速高，一般可达 4000～5500m/s，故威力大。

③ 感度高。由于加入了发泡剂，加上乳化、搅拌加工，使氧化剂水溶液变成微滴，敏化气泡均匀地吸留在其中，故爆轰感度较高，可达到雷管的感度。

④ 密度可调范围宽。由于加入了充气成分，可通过控制其含量来调节炸药密度；炸药的可调密度一般在 0.8～1.45g/cm$^3$ 之间。

⑤ 安全性能好。乳化炸药对于冲击、摩擦、枪击的感度都较低，而且爆炸后有毒气体生成量也少，使用安全，储存期较长。

为了实现乳化炸药在现场连续化混装，我国于 1982 年前后研究乳化炸药混装车及现场连续混装工艺，取得了成功，并已在某些矿山开始使用。

我国生产的乳化炸药有 RL、CLH、EL、RJ 等系列，表 2－5 列出了部分乳化炸药的成分配比和性能指标。



**表 2－5 部分国产乳化炸药的成分与性能**

| 炸药系列或型号 | | EL 系列 | CLH 系列 | SB 系列 | RJ 系列 | WR 系列 | 岩石型 | 煤矿许用型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 组成/% | 硝酸(钠) | 65～75 | 63～80 | 67～80 | 58～85 | 78～80 | 65～86 | 65～80 |
| | 硝酸甲胺 | — | — | — | 8～10 | — | — | — |
| | 水 | 8～12 | 5～11 | 8～13 | 8～15 | 10～13 | 8～13 | 8～13 |
| | 乳化剂 | 1～2 | 1～2 | 1～2 | 1～3 | 0.5～2 | 0.8～1.2 | 0.8～1.2 |
| | 油相材料 | 3～5 | 3～5 | 3.5～6 | 3～5 | 3～5 | 4～6 | 3～5 |
| | 铝粉 | 2～4 | 2 | — | — | — | — | 1～5 |
| | 添加剂 | 2.1～2.2 | 10～15 | 6～9 | 0.5～2 | 5～6.5 | 1～3 | 5～10 |
| | 密度调整剂 | 0.3～0.5 | — | 1.5～3 | 0.2～1 | — | — | 另加消焰剂 |
| 性能 | 爆速/(km·s$^{-1}$) | 4～5 | 4.5～5 | 4～4.5 | 4.5～5.4 | 4.7～5.8 | 3.9 | 3.9 |
| | 猛度/mm | 16～19 | — | 15～18 | 16～18 | 18～20 | 12～17 | 12～17 |
| | 殉爆距离/cm | 8～12 | 2 | 7～12 | >8 | 5～10 | 6～8 | 6～8 |

（续）

| 炸药系列或型号 | | EL 系列 | CLH 系列 | SB 系列 | RJ 系列 | WR 系列 | 岩石型 | 煤矿许用型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 性能 | 临界直径/mm | 12～16 | 40 | 12～16 | 13 | 12～18 | 20～25 | 20～25 |
| | 抗水性 | 极好 | 极好 | 极好 | 极好 | 极好 | 极好 | 极好 |
| | 储存期/月 | 6 | ＞8 | ＞6 | 3 | 3 | 3～4 | 3～4 |

## 2.4 煤矿许用炸药

众所周知，煤矿均有煤尘，而且一般还有瓦斯涌出。我国的大多数煤矿都是瓦斯矿井，尤以高瓦斯矿井和煤与瓦斯突出矿井居多。矿井瓦斯等级是按照平均日(一昼夜)产一吨煤的瓦斯涌出量和涌出形式来分组的。据此，我国的煤矿划分为以下几种。

(1) 低瓦斯矿井：瓦斯涌出量为 $10m^3/t$ 及其以下。

(2) 高瓦斯矿井：瓦斯涌出量为 $10m^3/t$ 以上。

(3) 煤与瓦斯突出矿井，也称“双突”矿井。

矿井的瓦斯等级越高，发生爆炸等灾害的危险性就越大。一般地说，井下空气中的瓦斯浓度为 4%～5%时，就有发生爆炸的危险。我国《煤矿安全规程》规定，当矿井瓦斯浓度达到 1%时，就应停止爆破作业，加强通风，以防止局部瓦斯浓度升高。

煤尘系指在热能的作用下能够发生爆炸的细煤粉。我国通常把粒径在 0.75～1.0mm 以下的煤粉叫做煤尘。煤尘不仅可以单独爆炸，而且可参与瓦斯一起爆炸，其危害更大。



### 1. 煤矿许用炸药特点

一般地说，允许用于有瓦斯和煤尘爆炸危险的炸药应该具有如下特点。

(1) 能量要有一定的限制，其爆热、爆温、爆压和爆速都要求低一些，爆炸后不致引起矿井的局部高温，这样可使瓦斯、煤尘的发火率降低。

(2) 应有较高的起爆敏感度和较好的传爆能力，以保证其爆炸的完全性和传爆的稳定性，这样可使爆炸产物中未反应的炽热固体颗粒量大大减少，从而提高其安全性。

(3) 有毒气体生成量应符合国家规定，其氧平衡应接近于零。一般地说，正氧平衡的炸药在爆炸时易生成氮氧化合物等易引起瓦斯发火的物质。而负氧平衡的炸药，爆炸反应本完全，会增加未反应的炽热固体颗粒，容易引起二次火焰，不利于防止瓦斯发火。

(4) 组分中不能含有金属粉末，以防爆炸后生成炽热固体颗粒。

为使炸药具有上述特性，煤矿许用炸药组合中添加了一定量的消焰剂——食盐、氯化铵或其他物质。

### 2. 煤矿许用炸药的分级与检验方法

(1) 煤矿许用炸药的分级。我国煤矿许用炸药按瓦斯安全性进行分组，其分级规定见原煤炭工业部部颁标准 MT-61-82。煤矿许用炸药的瓦斯安全性分为 5 级，各个级别许用炸药瓦斯安全性(巷道试验)的合格标准如下。

(1) 一级煤矿许用炸药：100g 发射臼炮检定合格，可用于低瓦斯矿井。

(2) 二级煤矿许用炸药：150g 发射臼炮检定合格，一般可用于高瓦斯矿井。

(3) 三级煤矿许用炸药：试验法 1：450g 发射臼炮检定合格；试验法 2：150g 悬吊检定合格，可用于瓦斯与煤尘突出矿井。

(4) 四级煤矿许用炸药：250g 悬吊检定合格。

(5) 五级煤矿许用炸药：450g 悬吊检定合格。

3. 煤矿许用炸药的常用种类

根据炸药的组成和性质，煤矿许用炸药可分为 5 类。

(1) 粉状硝酸铵类许用炸药。其通常以梯恩梯为敏化剂，多为粉状，表 2-6 中叙述的各品种均属此类。

表 2-6　煤矿许用硝铵类炸药的组成及性能

| 组成性能与爆炸参数设计值 | | 1 号煤矿硝铵炸药 | 2 号煤矿硝铵炸药 | 3 号煤矿硝铵炸药 | 1 号抗水煤矿硝铵炸药 | 2 号抗水煤矿硝铵炸药 | 3 号抗水煤矿硝铵炸药 | 2 号煤矿铵油炸药 | 1 号抗水煤矿铵沥蜡炸药 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 组成/% | 硝酸铵 | 68±1.5 | 71±1.5 | 67±1.5 | 68.6±1.5 | 72±1.5 | 67±1.5 | 78.2±1.5 | 81±1.5 |
| | 梯恩梯 | 15±0.5 | 10±0.5 | 10±0.5 | 15±0.5 | 10±0.5 | 10±0.5 | — | — |
| | 木粉 | 2±0.5 | 4±0.5 | 3±0.5 | 1±0.5 | 2.2±0.5 | 2.6±0.5 | 3.4±0.5 | 7.2±0.5 |
| | 食盐 | 15±1.0 | 15±1.0 | 20±1.0 | 15±1.0 | 15±1.0 | 20±1.0 | 15±1.0 | 10±0.5 |
| | 沥青 | — | — | — | 0.2±0.05 | 0.4±0.1 | 0.2±0.05 | — | 0.9±0.1 |
| | 石蜡 | — | — | — | 0.2±0.05 | 0.4±0.1 | 0.2±0.05 | — | 0.9±0.1 |
| | 轻柴油 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 性能 | 水分/% | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| | 密度 $/(g \cdot cm^{-3})$ | 0.95～1.10 | 0.95～1.10 | 0.95～1.10 | 0.95～1.10 | 0.95～1.10 | 0.95～1.10 | 0.85～0.95 | 0.85～0.95 |
| | 猛度/mm | 12 | 10 | 10 | 12 | 10 | 10 | 8 | 8 |
| | 爆力/ml | 290 | 250 | 240 | 290 | 250 | 240 | 230 | 240 |
| | 殉爆/mm | 6 | 5 | 4 | 6 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| | 爆速 $/(m \cdot s^{-1})$ | 3509 | 3600 | 3262 | 3675 | 3600 | 3397 | 3269 | 2800 |

(2) 许用含水炸药。这类炸药包括许用乳化炸药和许用水胶炸药。前者在我国尚处于发展阶段，多数是二、三级品，少数可达四级煤矿许用炸药的标准。后者只有淮北矿务局某厂生产，是从美国杜邦公司正式引进的。

这类炸药是近十几年来发展起来的新型许用炸药。由于它们组分中含有较大量的水，爆温较低，有利于安全，同时调节余地较大，因此有极好的发展前景。

(3) 离子交换炸药。含有硝酸钠和氯化铵的混合物称为交换盐或等效混合物。在通常情况下，交换盐比较安定，不发生化学变化，但在炸药爆炸的高温高压条件下，交换盐就会发生反应，进行离子交换，生成氯化钠和硝酸铵。

$$NH_4Cl + NaNO_3 = NaCl + NH_4NO_3 + 125kJ/mol \quad (2-1)$$

爆炸瞬间生成的氯化钠可作为消焰剂高度弥散在爆炸点周围，有效地降低爆温和抑制瓦斯燃烧。与此同时生成的硝酸铵，则作为氧化剂加入爆炸反应。

离子交换炸药还具有一种“选择爆轰”的独特性质，在不同的爆破条件下，它会自动调节消焰剂的有效数量和作用。例如，在密封状态下，炸药爆炸强烈，交换盐的反应更完全，生成的氯化钠更多，其消焰降温的作用更强；反之，在裸露状态下，爆炸反应进行得较弱，交换盐的反应也不完全，生成的硝酸铵减少，使爆炸释放的能量保持在较低的程度，甚至有可能造成爆轰中断，因而避免了裸露药包爆炸时引起瓦斯爆炸的事故。

(4) 被筒炸药。用含消焰剂较少，爆轰性能较好的煤矿硝铵炸药做药芯，其外再包裹一个用消焰剂做成的“安全被筒”，这样的复合炸药就是通常所说的被筒炸药。

当被筒炸药的药芯爆炸时，安全被筒的食盐被爆碎，并在高温下形成一层食盐薄雾，笼罩着爆炸点，更好地发挥消焰作用。因而这种炸药可用在瓦斯与煤尘突出矿井。被筒炸药的消焰剂含量可高达5%。

(5) 当量炸药。盐量分布均匀，而且安全性与被筒炸药相当的炸药称为当量炸药。当量炸药的含盐量要比被筒炸药高，爆力、猛度和爆热远比被筒炸药低。

## 本章小结

本章主要讲述了工业炸药的概念及其不同的分类方式，接着介绍了常用的工业炸药——起爆药、单质猛炸药和混合猛炸药，并对其进行了详细的阐述；随后着重介绍了常见的硝铵类炸药——粉状硝铵炸药和含水硝铵炸药；最后提到了煤矿许用炸药的条件、分类及常用的煤矿许用炸药。



## 习　　题

1. 说明工业炸药常用的分类及分类方法。
2. 说明几种常用的工业炸药及性能。
3. 说明硝铵类炸药可分为哪几类，及各自特征。
4. 说明煤矿许用炸药的条件，并举例分析。

# 第3章 炸药爆炸基本理论

爆炸是物质系统一种极其迅速的物理或化学变化，在变化过程中，瞬间放出其内含能量，并借助系统内原有气体或爆炸生成气体的膨胀，对系统周围介质做功，使之产生巨大的破坏效应，并伴随有强烈的发光和声响。爆轰是炸药稳定爆炸的表现形式。自19世纪末期以来，炸药和起爆器材有了很大的突破和发展。人们对爆轰过程也进行了深入的研究，并建立了以流体动力学为基础的爆轰理论。

## 教学目标

(1) 掌握炸药爆炸的基本理论，主要包括炸药和爆炸的基本概念、炸药的起爆和感度、炸药的传爆、炸药的氧平衡以及炸药的爆破性能。

(2) 利用炸药爆炸的基本理论，解释一些常见的爆炸现象和设计简单常规的爆破方案。



## 教学要求

| 知识要点 | 能力要求 | 相关知识 |
|---|---|---|
| 基本概念 | 掌握 | 爆炸；爆炸的三要素 |
| 起爆机理、感度 | 掌握 | 起爆能；起爆机理；感度 |
| 冲击波、爆轰理论 | 掌握 | 波；冲击波；爆轰理论 |
| 氧平衡、爆炸反应方程式 | 掌握 | 氧平衡的概念及意义；爆炸反应方程式的书写 |
| 炸药性能参数、爆破性能 | 熟悉 | 爆热；爆温；爆压；爆容；爆力；猛度；爆速 |


引例

### 世界最大爆破工程——宁夏大峰煤矿硐室爆破工程

2007年12月20日上午11时30分，随着一声沉闷的巨响，神华宁煤集团大峰煤矿羊齿采区的一座相对高度230m的山峰被削平约40m，在不到1s时间内滚滚弥漫的尘烟袅袅升起，5500t炸药不费吹灰之力，便将600多万立方米的山体“捏”个粉碎。爆炸当量相当于日本广岛核爆炸的1/4，相当于2006年朝鲜核试验的6倍，能量释放相当于一次5.0级左右的地震，规模世界罕见，是我国继白银铜矿、攀钢狮子山、珠海炮台山万吨级硐室爆破后，全国第4大硐室爆破，也是近17年以来世界第一大爆破工程。

# 3.1 爆炸和炸药的基本概念

1. 爆炸的定义及分类

从广义的角度看，爆炸是指在有限的体积内能量发生急剧转化的物理、化学过程。在该变化过程中，伴随着能量的快速转化，物质某种形式的内能转化为机械压缩能、光、热辐射等，且使原来的物质或其变化产物、周围介质产生机械运动。按爆炸的性质不同，爆炸可分为物理爆炸、核爆炸和化学爆炸 3 类。

(1) 物理爆炸：仅仅是物质形态发生变化，而化学成分和性质没有改变的爆炸现象。例如，锅炉爆炸、氧气瓶爆炸和自行车爆胎。

(2) 核爆炸：由核裂变或核聚变释放出巨大能量所引起的爆炸现象。例如，原子弹爆炸和氢弹爆炸。

(3) 化学爆炸：在爆炸前后，不仅发生物态的急剧变化，而且物质的化学成分也发生改变的反应。例如，炸药爆炸、瓦斯或煤尘爆炸、汽油与空气混合物的爆炸等都是化学爆炸。

炸药是一种相对安定的物质系统，在一定条件下能够发生快速化学反应，放出能量，生成气体产物，并显示爆炸效应的化合物或混合物。从组成元素来看，炸药主要是由碳、氢、氧、氮 4 种元素组成的化合物或混合物。需要指出的是，炸药爆炸通常是从局部分子被活化、分解开始的，其反应热又使周围炸药分子被活化、分解，如此循环下去，直至全部炸药反应完全。



2. 炸药爆炸的三要素

1) 反应的放热性

放出热量是爆炸得以进行的首要条件，使反应独立地、高速地进行的必需能源。下面以硝酸铵的不同化学反应为例。

常温下分解

$$NH_4NO_3 \rightarrow NH_3 + HNO_3 - 170.7kJ$$

加热至 200℃左右

$$NH_4NO_3 \rightarrow 0.5N_2 + NO + 2H_2O + 36.1kJ$$

或

$$NH_4NO_3 \rightarrow N_2O + 2H_2O + 52.4kJ$$

起爆药柱引爆

$$NH_4NO_3 \rightarrow N_2 + 2H_2O + 0.5O_2 + 126.4kJ$$

常温下，硝酸铵的分解是一个吸热反应，不能发生爆炸；但加热到 200℃左右时，分解反应为放热反应，如果放出的热量不能及时散失，炸药温度就会不断升高，促使反应速度不断加快和放出更多的热量，最终就会引起炸药的燃烧和爆炸；如果用起爆药柱(Primer Cartridge)引爆，硝酸铵发生剧烈的放热反应，即刻爆炸。可见，只有放热反应才可能具有爆炸性。

2）生成大量气体产物

炸药爆炸放出的热量必须借助气体介质才能转化为机械功。因此，生成气体产物是炸药做功不可缺少的条件。炸药能量转化的过程是如果物质的反应热很大，但没有气体产物形成，就不会具有爆炸性。

例如，铝热剂反应

$$2Al + Fe_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe + 828kJ$$

尽管反应非常迅速，且放出很多的热量，反应放出的热量足以把反应产物加热到3000K，但终究由于没有气体产物生成，没有把热能转变为机械能的媒介，无法对外做功，所以不具有爆炸性。只是高温产物逐渐地将热量传导到周围介质中去，慢慢冷却凝固。

炸药爆炸放出的热量不可能全部转化为机械功，但生成气体数量越多，热量利用率也越高。

3）反应的高速度

反应的高速度是爆炸过程区别于一般化学反应过程的重要标志。化学反应具备了放热性并不一定能够发生爆炸，例如，1kg 煤完全燃烧时放出的热量为 8912kJ，但因燃烧速度太低，燃烧产生的能量通过热传导和热辐射不断散失，所以不可能形成爆炸。1kg 梯恩梯炸药爆炸时放出的热量虽然只有 4226kJ，但其爆炸反应的时间只需十几到几十毫秒，因而会形成爆炸反应。

由于爆炸反应的速度极高，反应结束瞬间，其能量几乎全部聚集在炸药爆炸前所占据的体积内，因而能够达到很高的能量密度。炸药发生爆炸变化所达到的能量密度比一般燃料燃烧时达到的能量密度要高数百至数千倍。正是由于这个原因，爆炸过程才具有巨大的做功能力和强烈的破坏效应。

可见，放出热量、生成气体产物和反应的高速度是形成爆炸反应的 3 个基本条件。



3. 炸药化学变化的形式

爆炸并非炸药唯一的化学变化形式。由于环境和引起化学反应的条件不同，使反应的传播速度和性质有着很大差别。按照反应的速度及传播性质，炸药化学变化的基本形式可以分为缓慢分解、燃烧和爆轰。三者在性质上虽各不相同，但它们之间在一定条件下都是能够互相转化的：缓慢分解可发展为燃烧、爆炸；反之，爆炸也可转化为燃烧、缓慢分解。

1）缓慢分解

炸药的缓慢分解主要取决于环境的温度，温度越高则分解越显著。当温度升高到一定程度时，炸药缓慢的化学变化会自动转变为快速的化学变化，发生燃烧或爆轰。炸药缓慢分解与炸药燃烧和爆轰的主要区别在于，炸药热分解是在整个物质内部展开的，而炸药的燃烧和爆轰是在物质的某一局部，以化学反应波的形式一层一层地自动进行传播。

炸药的缓慢分解是一个很复杂的反应过程，其主要特点是：炸药内的各点温度相同；在全部炸药内反应同时进行，没有集中的反应区；分解时，既可以吸热，也可以放热，决定于炸药的类型和环境温度。但当温度较高时，所有炸药的分解反应都伴随有热量放出。

分解反应若为放热反应，如果放热量不能及时散失，炸药温度就会不断升高，促使反应速度不断加快和放出更多的热量，最终引起炸药的燃烧和爆炸。因此，在储存、加工和使用炸药时，要采取加强通风等措施，防止由于炸药分解产生热积累而导致意外爆炸事故的发生。

分解时一般要放出热量，失去重量，生成气体、固体或液体的产物。因此可以用测热、测气体压力、测凝聚相失重等方法来确定炸药的热分解情况，这也是测定炸药安定性的一个途径。

2）炸药的燃烧

炸药的燃烧与其他可燃物燃烧有着本质的区别，不需要外界供氧或其他助燃气体的供给，依靠自身所含的氧进行反应，几乎不受环境影响。因此，炸药的燃烧被广泛地应用于各种军用弹药、火箭、火工品、导火索等技术中。

炸药的燃烧可以分为稳定燃烧和不稳定燃烧，这主要取决于燃烧过程中燃烧速度的变化，若燃烧速度保持定值就称为稳定燃烧，否则就称为不稳定燃烧。稳定燃烧速度一般为每秒几毫米至每秒几米，最高只能达每秒几百米，低于炸药的声速，因为炸药的燃烧主要靠热传导来传递能量。炸药的燃烧不是在全部物质内同时展开的，而只是在局部区域内进行并在物质内传播。进行燃烧的区域称为燃烧区或反应区，反应区沿物质向前传播，其传播的速度称为燃烧速度，通常有两种表示方法，一是燃烧的线速度，指火焰阵面沿炸药法线方向传播的线速度(cm/s)；二是燃烧的质量速度，即火焰阵面上单位面积及单位时间反应了的炸药量($g/cm^2 \cdot s$)。燃烧的质量速度等于燃烧的线速度乘以炸药的密度。

一般情况，凝聚炸药的燃烧速度随压力增大而加快，当压力高于某一上限时，燃烧转为爆轰，低于某一下限时，燃烧熄灭。

3）炸药的爆轰

炸药爆炸的过程与燃烧过程相类似，化学反应也只在局部区域内进行并在炸药中传播，反应区的传播速度称为爆炸速度。若爆速保持定值，就称为稳定爆炸，稳定爆炸又称为爆轰，否则称为不稳定爆炸。爆轰速度可达2000～9000m/s;，产生的压力可达数千至数万兆帕。

炸药燃烧与爆轰的主要特征及区别见表3-1。

**表3-1 燃烧与爆轰的特征比较**

| 变化过程 / 项目 | 燃烧 | 爆轰 |
| --- | --- | --- |
| **传播速度** | 每秒几毫米至几米(低于炸药中音速)，受外界压力影响大 | 每秒几百米至几千米(高于炸药中音速)受外界压力影响小 |
| **传播的性质** | 热传导、扩散、辐射 | 冲击波 |
| **对外界的作用** | 燃烧点压力升高不大，在一定条件下才对周围介质产生爆破作用 | 爆炸点有剧烈的压力突跃，无需封闭系统便能对周围介质产生强烈的爆破作用 |
| **产物运动方向** | 与波阵面的运动方向相反 | 与波阵面的运动方向一致 |

# 3.2 炸药的起爆和感度

## 3.2.1 炸药的起爆机理

1. 起爆和起爆能

炸药是具有一定稳定性的物质，如果没有任何外部能量的作用，炸药可以保持它的平衡状态。为了使炸药爆炸变为现实，还必须给炸药以一定的外作用。从外部提供足够能量，激发炸药开始发生爆炸反应的过程称为起爆；足以引起炸药爆炸的外加能量，叫做起爆能或初始冲能。通常，工业炸药起爆能主要有热能、机械能、爆炸冲能，此外还有利用激光、电磁感应进行起爆的。

(1) 热能。利用加热作用使炸药起爆。能够引起炸药爆炸的加热温度称为起爆温度，热能的来源有直接加热、火焰、电火花或电线灼热等。工业雷管多利用这种形式的起爆能。

(2) 机械能。通过撞击、摩擦、针刺等机械作用使炸药起爆，实质上是将机械能转化为热能。这种形式多用于武器。

(3) 爆炸冲能。利用起爆药爆轰产生的爆轰冲击波及高温、高压气体产物流动的动能，可以使猛炸药起爆。利用雷管或起爆药柱等产生的爆炸冲能可使一般炸药起爆。

各种炸药起爆的难易程度相差很大，如叠氮化铅、DDNP 炸药，受轻微摩擦冲击即可爆炸；而矿用炸药的主要成分硝酸铵却要用高威力起爆药包才能起爆。不同炸药起爆时所需要的某种形式的外能是不同的。外能作用能否引起炸药爆炸，这不仅和炸药的物理、化学性质、炸药的物理状态、装药结构等有关，而且还取决于所加能量大小以及能量集中程度等条件。所有这些因素对炸药的起爆都有重要影响。

2. 炸药的起爆机理

炸药起爆必须有足够的外能使部分炸药分子变为活化分子。活化分子数量越多，其能量同分子平均能量相比越大。则爆炸反应速度也越高。

图 3-1 表示炸药爆炸反应过程中能量的变化。能量级 $E_1$ 是炸药的分子平均能量，能量级 $E_2$ 则是炸药分子碰撞发生化学反应后所具有的最低能量能量级，$E_3$ 是爆炸产物的分子平均能量。显然，为了使炸药分子的能量 $E_1$ 从状态 1 提高到 $E_2$ 以达到活化状态 2，就必须使能量增加 $E_{1,2}$。$E_{1,2}$ 就是活化能。起爆时，外能转化为炸药分子活化能，造成足够数量的活化分子，并因它们的互相接触、碰撞而发生爆炸反应。

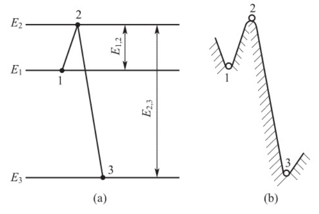


图 3-1 炸药爆炸的能栅图

图 3-1 中 $E_{2,3}-E_{1,2}$，即 $\Delta E$ 表示反应过程终了释放出的热量，说明该过程为放热反

应。许多炸药的活化能约为 125～250kJ/mol。相应地，爆炸反应释放出的热能约为 840～1250kJ/mol，远大于所需活化能量，完全足以生成更多的新的活化分子，保证自动加速反应的进行。因此，外能越大越集中，炸药局部温度越高，形成的活化分子越多，则引起炸药爆炸的可能性越大。反之，如果外能均匀地作用于炸药整体，则需要更多的能量才能引起爆炸。这一点对于热点起爆过程尤为重要。

形象地讲，从状态 1 激发到状态 2 所需的能量 $E_{1,2}$ 越小，炸药的感度越高；反之，若 $E_{1,2}$ 越大，则感度越低。

1）热能起爆机理

在一定条件下(温度、压力等)若炸药因热分解的作用下，反应放出的热量大于热传导(向外)所散失的热量，就能使炸药的内部发生热积累，从而使反应自动加速，温度升高，反应更快，温度更高，如此循环发展最后导致爆炸。这就是 H. H. 谢苗诺夫建立的混合气体热自动点火热能爆炸理论的基本观点。

因此，炸药发生爆炸的条件有两个：一是放热量大于散热量，即炸药中能产生热积累；二是炸药受热分解反应的放热速度大于环境介质的散热速度。只有这样，才能使炸药内的温度不断上升，引起炸药的自动加速反应和导致爆炸。

炸药在热作用下发生爆炸的过程是一个从缓慢变化到突然升温爆炸的过程，即炸药的温度随时间的变化开始是缓慢上升的，其分解的反应速度也是逐渐增加的，只有经过一定的时间后温度才会突然上升，从而出现爆炸。因此，在炸药爆炸前，还存在一段反应加速期，称为爆炸延时期或延迟时间。炸药爆炸反应时间主要决定于延迟时间，其本身反应时间很短。使炸药发生爆炸的温度称为爆发点，爆发点并不是指爆发瞬间的炸药温度，而是指炸药分解自行加速时的环境温度。爆发点越高，延迟时间越短。其间存在以下关系

$$\tau = c e^{\frac{E}{RT}} \tag{3-1}$$

式中，$\tau$——延迟时间；

$c$——与炸药成分有关的常数；

$E$——炸药的活化能；

$R$——通用气体常数；

$T$——爆发点。

2）机械能起爆机理

长期以来，人们对炸药的起爆及其机理作了大量的实验和理论研究。最早提出的是贝尔特罗假设(即所谓的“热学说”)：机械能变为热能，使整个受试验的炸药温度升高到爆发点，因而使炸药发生爆炸。这个论点后来引起人们的怀疑。因为计算表明，即使起爆冲击能全部转化为热能被它吸收，像雷汞这样的炸药的温度也只能提高 20℃左右，而此温度根本不可能使雷汞爆炸；对其他一些炸药进行计算后也表明，假设炸药在受撞击时所吸收的能量被均匀地分散到整个炸药中，则由于撞击的时间很短，即使炸药的体积很小，温度的上升也不可能使炸药发生爆炸反应，何况实际情况是炸药在撞击过程中所吸收的能量远小于它的临界撞击能。因此，热假设的理论受到了人们的怀疑。

以后又出现了“摩擦化学假说”：炸药受冲击时，炸药的个别质点(晶粒)一方面与其他质点互相接近，即增大其紧密性，而另一方面彼此相互移动，亦在相邻表面上互相滑动，此时在表面上产生两种力(法向力和切向剪力)，法向力使一个质点分子上的原子可能

落到第二个质点表面上分子引力作用范围之内，而切向剪力的作用可引起表面破坏的原子间键的破坏，最后使化学反应的分子变形并发生爆炸。这种摩擦化学假说既没考虑热的作用，又没考虑有些炸药分子的键能非常大，在一般的机械作用下要直接破坏这种分子是相当困难的。因此摩擦化学假设理论具有很大的局限性。

目前，较为公认的是“热点学说”，它是由英国的布登在研究摩擦学的基础上于20世纪50年代提出来的，由于热点学说能较好地解释炸药在机械能作用下发生爆炸的原因，因此得到了人们的普遍认可。

热点学说认为，当炸药受到撞击或摩擦时，机械能首先转化成热能，由于产生的热来不及均匀地分布到全部试样上，故在小的局部范围内聚集形成小点，在小点处发生热分解，又因为分解的放热性，分解速度迅速增加，小点内形成强烈反应，结果引起部分炸药或全部炸药爆炸。这些温度很高的局部小点称为热点或灼热核。在机械作用下，爆炸首先从这些热点处开始，而后扩展到整个炸药的爆炸。

热点学说认为，热点的形成和发展大致经过以下几个阶段。

(1) 热点的形成阶段。

(2) 热点的成长阶段，即以热点为中心向周围扩展的阶段，其主要表现形式是速燃。

(3) 低爆轰阶段，即由燃烧转变为低爆轰的过渡阶段。

(4) 稳定爆轰阶段。

热点或灼热核的形成主要有3种原因。

(1) 炸药中的微小气泡受冲击绝热压缩，骤然加热，温度上升很高，成为引起炸药爆炸的灼热核。

(2) 炸药颗粒之间或炸药与夹杂物或炸药与容器之间发生强烈摩擦而形成灼热核。

(3) 高速粘滞流动产生灼热核，是液体炸药或低熔点炸药(无气泡存在时)发生爆炸的原因之一。

如果冲击能足够大，冲击区内部分炸药熔化形成少量液体，并迅速地在固体炸药微粒间流过发生黏性流动而产生灼热核。炸药的塑性流变和黏性流变过程及粒子的摩擦效应对起爆起着决定性作用。

当灼热核满足一定的条件，即灼热核半径 $r=10^{-3}\sim10^{-5}$ cm，灼热核的温度对起爆炸药为350～600℃、对工业炸药为500～800℃，作用时间在 $10^{-7}$ s以上，才能形成爆炸。

3) 爆炸冲击波起爆机理

冲击波是一种强烈的压缩波，炸药受到冲击波的强烈压缩要产生热，因此冲击波起爆是属于热起爆范畴的。在弹药或爆破技术中经常有这种情况：一种炸药爆炸后产生的冲击波通过某一介质去起爆另一种炸药。例如，引信的传爆药柱爆炸后往往经过金属管壳、纸垫或空气再引爆另一种炸药；聚能装药中用隔板来调整波形，也是利用冲击波通过隔板传爆的方式；在爆破工程中，如何使相邻炸药殉爆完全，也是个强冲击波起爆的问题。若是均相炸药(即不含气泡、杂质的液体炸药或单晶体炸药)受冲击波作用，其冲击波面上一薄层炸药均匀受热升温，此温度如达到爆发点，则经过一定延滞期后发生爆炸。若是非均相炸药受到冲击，则由于炸药受热的不均匀性，使在局部率先产生热点，爆炸首先在热点开始并扩展，然后引起整个炸药的爆炸。

4）光起爆机理

炸药在光作用下的起爆机理，目前得到公认的仍然是光能转变为热能而起作用的热机理。其有 3 种基本情况：一种是光起爆是热作用，即炸药受到阳光照射时，很薄的表面层吸收了光能，并在很短的时间内转变为热，然后发生爆轰；另一种为光化学分解起作用，当炸药受阳光照射时，其表面物吸收光能而导致电子的激发，引起了光化学反应，反应放出的热量传给下一层炸药，在适当的条件下(得热→失热)以热爆炸的形式扩展；三是对于敏感的猛炸药(PETN，RDX)可用激光引爆。

5）电能起爆机理

炸药在电能作用下激起爆炸的机理，分为电能转化为其他能量起爆和电击穿起爆两类。如桥丝式电火工品的起爆是电能转化为热能引起的起爆，属于热起爆机理范畴。又如炸药在外界强电场作用下，可引发其爆炸，属于电击穿起爆作用，不同于一般的热起爆机理。电能起爆广泛应用于压电引信、无线电引信及导弹引信等，还用作航天飞行器解脱金属件的动力能源，如爆炸螺栓、切割索、火箭级间分离器等。另外在外界电能，如静电、射频、杂散电流等作用下，电火工品也容易引起爆炸。

**小知识**

弗兰克-卡曼涅斯基发展了定常热爆炸理论，这一理论进一步考虑了温度在反应混合气体中的空间分布。

莱第尔、罗伯逊将热爆炸理论应用于凝聚炸药的起爆研究中，提出了热点学说。这一学说揭示了撞击、摩擦、发射惯性力等机械作用下炸药激发爆炸的机理和物理本质。

布登、约夫等把热爆炸理论进一步扩展到起爆药的起爆研究中，并对热爆炸的临界条件的某些参数进行了计算。



### 3.2.2 炸药的感度

炸药在外界作用下发生爆炸反应与否以及发生爆炸反应的难易程度称为炸药的感度或敏感度。炸药感度的高低以激起炸药爆炸反应所需起爆能的多少来衡量。感度与所需起爆能成反比。炸药对某种形式起爆能的感度过高，就会在炸药生产、运输、储存、使用过程中造成危险。而使用炸药时，感度过低，就会给使用炸药造成困难。

炸药对不同形式的起爆能具有不同的感度。例如，梯恩梯对机械作用的感度较低。但对电火花的感度则较高；特屈拉辛的机械感度比斯蒂芬酸铅的高，但火焰感度则相反。为研究不同形式的起爆能起爆作用的难易程度，将炸药感度区分为热感度、机械感度、起爆冲能感度、冲击波感度和殉爆、静电火花感度、激光感度和枪击感度等。

1. 热感度

炸药的热感度是指炸药在热作用下发生爆炸的难易程度。热作用的方式主要有两种：均匀加热和火焰点火，习惯上把均匀加热时炸药的感度称为热感度，而把火焰点火时的炸药感度称为火焰感度。

1）加热感度

加热感度用来表示炸药在均匀加热的条件下发生爆炸的难易程度，通常采用炸药在一定条件确定出的爆发点来表示。爆发点低的炸药容易因受热而发生爆炸，其加热感度高。

表 3-2 列出了一些常用炸药的爆发点。

表 3-2 常用炸药的爆发点

| 炸药名称 | 爆发点/℃ | 炸药名称 | 爆发点/℃ |
| --- | --- | --- | --- |
| EL 系列乳化炸药 | 330 | 硝酸铵 | 300 |
| 2 号岩石铵梯炸药 | 186～230 | 黑火药 | 290～310 |
| 3 号露天铵梯炸药 | 171～179 | 黑索今 | 215～235 |
| 2 号煤矿铵梯炸药 | 180～188 | 特屈儿 | 195～200 |
| 3 号煤矿铵梯炸药 | 184～189 | 梯恩梯 | 290～295 |
| 硝化甘油炸药 | 200 ～205 | 二硝基重氮酚 | 170～175 |

爆发点一般采用测定炸药在规定时间(5min)内起爆所需加热的最低温度来表示。爆发点测定仪如图 3-2 所示。测定时，用电热丝加热使温度上升(到预计爆发点)，然后将装有 0.05g 炸药试样的铜管迅速插入合金浴(低熔点的伍德合金，熔点 65℃)中，插入深度要超过管体的 2/3。如在 5min 内不爆炸，则需要将温度升高 5℃再试。如此反复试验，直到求出被试炸药的爆发点。

2）火焰感度

炸药在明火(火焰、火星)作用下，发生爆炸的难易程度称为火焰感度。常用火焰感度测定装置来测定火焰感度。火焰感度用上下限表示。上限即使炸药 100%发火的最大距离，下限即使炸药 100%不发火的最小距离。一般采用 6 次平行测试的平均值。下限表示炸药对火焰的安全程度，因此上线大则炸药感度大，下限大则炸药的危险性大。下面给出黑火药和几种起爆药的火焰感度，见表 3-3。



表 3-3 黑火药和几种起爆药的火焰感度

| 炸药名称 | 雷汞 | 叠氮化铅 | 斯蒂酚酸铅 | 特屈拉辛 | 二硝基重氮酚 | 黑火药 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 100%发火的最大距离/cm | 20 | <8 | 54 | 15 | 17 | 2 |

2. 机械感度

炸药在机械作用(如撞击、摩擦、针刺、惯性等)发生爆炸变化的难易程度称为机械感度。

1）冲击感度

冲击感度是指炸药在机械撞击下发生爆炸的难易程度。常用的测定仪器是立式落锤仪。冲击感度一般用 25 次试验中爆炸次数的百分数表示

$$P=\frac{25\text{ 次试验中发生爆炸的次数}}{25} \tag{3-2}$$

常用的锤质量有 10kg、5kg、2kg。测定时，炸药样品放到撞击装置的两个击柱中间，使重锤自由下落，撞在击柱上。受撞击的炸药凡是发生声响、发火、冒烟等现象之一均为爆炸。几种常用炸药的撞击感度见表 3-4。

2）摩擦感度

摩擦感度是指在摩擦作用下，炸药发生爆炸的难易程度。以摩擦作用作为初始冲能来

引爆炸药的并不多，手榴弹中的拉火管是靠摩擦发火的。从安全的观点看，炸药在生产、运输和使用过程中经常会遇到摩擦作用，或是撞击和摩擦都有。因此研究炸药的摩擦感度是很重要的。

我国普遍采用摆式摩擦仪来测定炸药的摩擦感度。测定装置示意图如图 3－2 所示。测定时，将摆锤臂悬挂成所需的摆角(一般悬挂成 90°)，打击在击杆 1 上，使上击柱 4 滑动 1.5～2mm 的水平距离，以摩擦炸药试样观察爆炸与否。平行试验 25 次，计算爆炸百分数。爆炸百分数越高，摩擦感度越大。表 3－4 列出了几种炸药的摩擦感度的数据。

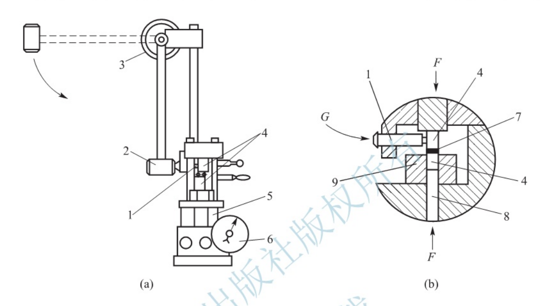



**图 3－2　摩擦摆**

1—击杆；2—摆锤；3—角度标盘；4—上、下滑柱；5—油压机；6—压力计；7—炸药试样；8—顶杆；9—滑柱套；F—压力（施加方向）；G—摆锤击打方向



**表 3－4　几种炸药的撞击感度和摩擦感度**

| 项目＼炸药名称 | 乳化炸药 | 2 号岩石铵梯炸药 | 硝化甘油炸药 | 黑索今 | 特屈儿 | 黑火药 | 梯恩梯 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 撞击感度/% | ≤8 | 20 | 100 | 70～75 | 50～60 | 50 | 4～8 |
| 摩擦感度/% | 0 | 16～20 | — | 90 | 24 | — | 0 |

3. 起爆冲能感度

炸药的起爆感度是指猛炸药在其他炸药(起爆药或猛炸药)的爆炸作用下发生爆炸变化的能力，也称为爆轰感度。引爆炸药并保证其稳定爆轰所应采取的起爆装置(雷管、起爆药柱等)决定于炸药的起爆感度。引爆炸药时，炸药受到起爆装置爆炸产生的冲击波(即激发冲击波)和高温爆炸产物的作用。因此，炸药的起爆感度与热感度、冲击感度有关。

引爆炸药并使之达到稳定爆轰所需要的最低起爆冲能即临界冲能，并可用它来表示炸药的起爆感度。凡是用雷管能够直接引爆的炸药(称具有雷管感度的炸药)，临界冲能可以采用引爆炸药所需要的最小起爆药量(又称为极限起爆药量)来表示，并用它来比较各种炸药的相对起爆感度。

猛炸药的极限起爆药量的试验方法为：将 1g 被测猛炸药试样用 50MPa 的压力压入

8 号铜质雷管壳中，以 30MPa 的压力将一定质量的起爆药压入雷管壳中，扣上加强帽，最后用 100mm 长的导火索装在雷管的上口。将装好的雷管放在 $\Phi40\times4$mm 的铅板上，点燃导火索引爆雷管。观察爆炸后的铅板，如果铅板被击穿且孔径大于雷管的外径，则表明猛炸药完全爆轰，否则，说明猛炸药没有完全爆轰。改变药量，重复上述实验，经过一系列的试验，可测定猛炸药的最小起爆药量。几种猛炸药的最小起爆药量见表 3－5。

**表 3－5　几种猛炸药的最小起爆药量(g)**

| 起爆药 | 猛炸药 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 太安 | 梯恩梯 | 特屈儿 | 黑索今 |
| 雷汞 | 0.36 | 0.165 | 0.19 | 0.17 |
| 叠氮化铅 | 0.16 | 0.03 | 0.05 | 0.03 |
| 二硝基重氮酚 | 0.163 | 0.075 | — | 0.09 |
| 雷酸银 | 0.095 | 0.02 | — | — |



从表 3－5 可以看出：同一起爆药对不同猛炸药的最小起爆药量不同，这说明不同的猛炸药对起爆药爆炸具有不同的爆轰感度，此外，不同的起爆药对同一猛炸药的起爆能力也不相同。

对一些起爆感度较低的工业炸药，如铵油炸药、浆状炸药等，用少量的起爆药是难以使其爆轰的，这类炸药的起爆感度不能用最小起爆药量来表示，而只能用威力较大的中继传爆药柱的最小质量来表示。

应该指出，起爆药的起爆能力与被起爆平面的大小有很大的关系，随着被起爆面积的增加，起爆药的起爆能力可以在一定的范围内增大，最合适的起爆条件是：起爆药的直径 $d$ 与被起爆装药的直径 $D$ 相同，即 $d/D=1$，否则，由于侧向膨胀能力损失过大，起爆能力将明显降低。

4. 冲击波感度和殉爆

1）冲击波感度

炸药在冲击波作用下发生爆炸的难易程度，称为炸药的冲击波感度。

炸药对冲击波感度的试验方法和表示方法常用的为隔板试验(图 3－3)。该法是在主发炸药(用以产生冲击波)和被发炸药(被冲击波引爆)间放置惰性隔板(金属板或塑料片)，常用升降法测定使被发炸药发生 50%爆炸的临界隔板厚度，作为评价冲击波感度的指标。主发炸药被雷管引爆后，输出的冲击波压力为隔板所衰减后再作用于被发炸药上，观察后者是否仍能被引爆。改变隔板厚度试验，即可求得起爆被发炸药的最大隔板厚度或被发炸药 50%爆炸的隔板临界厚度。隔板厚度与隔板材料及其大小(大隔板及小隔板)有关。隔板材料可以是空气、水、纸板、石蜡、有机玻璃、金属或其他惰性材料，隔板尺寸也有多种。

2）殉爆

如图 3－4 所示，装药 A 爆炸时，引起与其相距一定距离的被惰性介质(空气、水、土壤、岩石、金属或非金属材料等)隔离的 B 装药爆炸，这一现象称作殉爆。

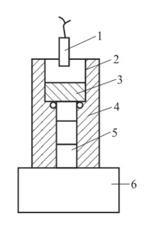



图 3-3　隔板试验

1—雷管；2—主发装药；3—隔板；
4—固定器；5—被发装药；6—验证板

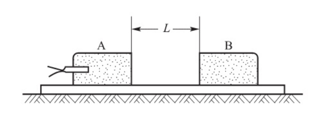



图 3-4　炸药殉爆试验

A—主动装药；
B—被动装药；L—殉爆距离

在一定程度上，殉爆反映了炸药对冲击波的感度。炸药的殉爆能力用殉爆距离表示，引起殉爆时两装药间的最大距离称为殉爆距离。凡是影响起爆能力的诸因素，都可以影响殉爆距离。

要使被动炸药发生爆炸，在炸药内产生冲击波的压力和冲能必须大于其临界值。殉爆距离可根据其临界值和起爆冲能来计算。

根据透入到被动装药内的冲击波压力应等于临界压力的原则，确定的殉爆距离计算公式为

$$R_c=KG^{\frac{1}{3}} \tag{3-3}$$

式中，$R_c$——殉爆距离，m；

$G$——药量，kg；

$K$——决定于主、被装药性质，介质性质和被动装药对冲击波感度的系数，可通过模拟试验来确定。

根据透入到被动装药内的起爆冲能应等于临界起爆能的原则，确定的殉爆距离计算公式为

$$R_c=KG^{\frac{2}{3}} \tag{3-4}$$

实际上，很难判断是压力、还是冲能起决定性作用，故需根据要解决的具体任务来选择以上公式中的指数：为安全起见，应取较大的指数，同时还要考虑必要的安全系数；为可靠殉爆起见，应取较小指数。

保证绝对不发生殉爆的距离称为殉爆安全距离。计算空气中的殉爆安全距离时，$K$ 值可按表 3-6 选取。



表 3-6　计算殉爆安全距离的系数 $K$

| 主动装药炸药类型 | 被动装药 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 装药类型 | 铵梯炸药 | 梯恩梯 | | 黑索今、特屈儿、泰安 | | |
| | | A | B | A | B | A | B |
| 铵梯炸药 | A | 0.25 | 0.15 | 0.40 | 0.30 | 0.70 | 0.55 |
| | B | 0.15 | 0.10 | 0.30 | 0.20 | 0.55 | 0.40 |

（续）

| 主动装药炸药类型 | 被动装药 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 装药类型 | 铵梯炸药 | 梯恩梯 | | 黑索今、特屈儿、泰安 | | |
| | | A | B | A | B | A | B |
| 梯恩梯 | A | 0.80 | 0.60 | 1.20 | 0.90 | 2.10 | 1.60 |
| | B | 0.60 | 0.40 | 0.90 | 0.50 | 1.60 | 1.20 |
| 黑索今、特屈儿、泰安 | A | 2.00 | 1.20 | 3.20 | 2.40 | 5.50 | 4.40 |
| | B | 1.20 | 0.80 | 2.40 | 1.60 | 4.40 | 3.20 |

注：A——敞露式装药；B——半掩埋或有土堤的装药。

雷管的殉爆安全距离，可按式(3-5)计算

$$R_d = K'\sqrt{N} \tag{3-5}$$

式中，$N$——雷管的个数；

$K'$——系数，若考虑炸药和雷管之间发生殉爆，取 $K'=0.06$；考虑雷管和雷管之间发生殉爆，取 $K'=0.1$。

**【例题 1】** 地面铵梯炸药库房容量为 8t，梯恩梯库房容量为 5t，雷管库房容量为 50000 发，计算各库房间的安全距离(库房均为敞露式)。

**【解答】** 将梯恩梯看作是主动装药，铵梯炸药看作被动装药，有表 3-6 查得 $K=0.8$，代入式(3-4)得

$$R_c = KG^{\frac{2}{3}} = 0.8\times5000^{\frac{2}{3}} = 233.9(\text{m})$$

将铵梯炸药看作主动装药，梯恩梯看作被动装药，由表 3-6 查得 $K=0.40$，代入式(3-4)得

$$R_c = KG^{\frac{2}{3}} = 0.4\times8000^{\frac{2}{3}} = 160(\text{m})$$

因此，两库房的距离不能小于 234m。

雷管库房距炸药库房的距离按式(3-5)计算得

$$R_d = K'\sqrt{N} = 0.06\sqrt{50000} = 13.4(\text{m})$$

因此，研究炸药的殉爆现象有重要意义。一方面在实际应用中要利用炸药的殉爆现象，如引信中雷管或中间传爆药需要通过隔板来起爆或隔爆传爆药，它也是工业炸药生产中检验产品质量的主要方法之一，用殉爆距离可反映被发装药的冲击波感度，也可以反映主发装药的引爆能力。另一方面，研究殉爆现象可为火炸药生产和储存的厂房、库房确定安全距离提供基本依据。

最常用的殉爆距离测试方法，通常采用炸药产品的原装药规格，将砂土地面铺平，用与药卷直径相同的金属或木质圆棒在砂土地面压出一个半圆形凹槽，长约 60cm，将两药卷放入槽内，中心对正，精确测量两药卷之间的距离，在主爆药卷的引爆端插入雷管，每次插入深度应一致，约占雷管长度的 2/3。引爆主发药卷后，如果被发药卷完全爆炸，则增大两药卷之间的距离，重复试验，反之，则减小两药卷之间的距离，重复试验；增大或减小的步长为 10mm。取连续 3 次发生殉爆的最大距离为该炸药的殉爆距离。

在工业炸药的技术要求中，一般规定一个殉爆距离的标准，因此在生产性检验时，可直

接按标准取值，若连续 3 次均殉爆，即认为合格，一般不再测试该炸药确切的殉爆距离。

5. 静电火花感度

炸药的静电火花感度指在静电火花的作用下炸药发生爆炸的难易程度。炸药大多是绝缘物质，其比电阻在 1012Ω/cm 以上，炸药颗粒间及与物体摩擦时都能产生静电。在炸药生产和加工过程中，不可避免地会发生摩擦，如球磨粉碎、混药、筛药、压药、螺旋输送、气流干燥等工艺过程都发生炸药之间的摩擦或炸药与其他物体之间的摩擦，因摩擦而产生的静电往往可达 102～104V 的高压，尤其是在干燥季节更甚。在一定条件下(如电荷积累起来又遇到间隙)，就会迅速放电，产生电火花，可能引起炸药的燃烧和爆炸。如果在火花附近有可燃性气体和炸药粉尘，就更容易引燃。因此静电是火炸药工厂、火工厂及弹药装药厂发生事故的重要因素之一。

防止静电产生事故，主要在于防止静电的产生和静电产生后的及时消除，使静电不致过多地积累。防止静电危害的方法从机理上说大致可分为两类：第一类是泄漏法。这种方法实质上是让静电荷比较容易地从带电体上泄漏散失，从而避免静电积累。接地、增湿、加入抗静电添加剂，以及铺设导电橡胶或喷涂导电涂料等措施，都属于这一类。第二类是中和法。这种方法实质上是给带电体加一定量的反电荷，使其与带电体上的电荷中和，从而避免静电的积累，消除静电的危害。防止静电的具体措施有：设备接地；增加工房的潮度；在工作台或地面铺设导电橡胶；在炸药颗粒和容器壁上加上导电物质；使用压气装药时，应采用敷有良好导电层的抗静电聚乙烯软管做输药管等。

6. 激光感度

炸药的激光感度是指在激光能量作用下，炸药发生爆炸的难易程度，常用 50%发火能量来表示。此值与激光波长、激光输出方式及激光器其他工作参数有关。目前一般认为，自由振荡激光器引爆炸药基本上按照热起爆机理进行，激光引爆炸药则可能除热作用外，还存在光化学反应和激光冲击反应。测定激光感度时，先根据试样将激光能量调到合适范围，再以升降法改变激光能量，观察试样是否燃烧或爆炸，并找出 50%发火的激光能量。

**小知识**

我国从 1967 年开始激光点火的研究。早期的工作主要侧重于激光引爆炸药的实验研究，之后在激光点燃烟火药、激光感度实验、激光点火机理与过程、激光点火的数值模拟、激光点火的安全可靠性分析等方面进行了不同层次、不同方向的研究。

7. 枪击感度

炸药的枪击感度又称为抛射体撞击感度，是指用枪弹等高速抛射体撞击下，炸药发生爆炸的难易程度。落锤撞击炸药是低速撞击，抛射体撞击炸药是高速撞击，后者比前者更加准确评价炸药在使用过程中的安全性和起爆感度。中国规定采用 7.62mm 步枪普通枪弹，以 25m 的射击距离射击裸露的药柱或药包，观察其是否发生燃烧或爆炸。以不小于 10 发试验中发生燃烧或爆炸的概率表示试样的枪击感度。也可采用 12.7mm 机枪法测定固体炸药的枪击感度，此法是根据试验现象、回收试样残骸及破片和实测空气冲击波超压综合评定试样的感度。美国军用标准规定用 12.7mm×12.7mm 铜柱射击裸露的压装或铸装药柱，通过增减发射药量调节弹速，用升降法测定 50%爆炸所需要的弹丸速度。欧洲标

准是以直径为15mm、长度不小于10mm的黄铜弹丸射击直径30mm试样，找出引起炸药爆炸的最低速度。当用低于该速度10%范围内的弹丸速度进行四发射击，如都能不引起药柱反应，则确认该速度为极限速度。

# 3.3 炸药的传爆

工程爆破中通常都用雷管来起爆炸药。雷管的爆炸能量比起爆药包的爆炸能量要小得多，雷管的作用仅在于激起与它邻近的局部炸药分子爆炸，至于整个药包能否完全爆炸，则取决于炸药爆炸的稳定传爆。因此，研究炸药爆轰反应过程保证整个药包的完全爆轰，具有重要意义。

炸药的爆轰是爆轰波沿炸药(爆炸物)一层层地进行传播的过程，这种爆轰波实际是沿爆炸物传播的一种强冲击波；炸药爆炸对周围介质的作用与爆轰气体产物的高速流动及在介质中形成的压力突跃的传播是紧密相关的。通常将炸药由起爆开始到爆炸终了所经历的过程称为炸药的传爆。目前一般公认的爆轰理论为爆轰流体动力学理论。该理论的基本观点如下。

(1) 炸药的爆轰是冲击波在炸药中传播而引起的。

(2) 炸药在冲击波作用下的快速化学反应所释放出的能量又支持了冲击波的传播，使其波速保持恒定而不衰减。

(3) 爆轰参数是以流体动力学为基础计算的。



## 3.3.1 波的基本概念

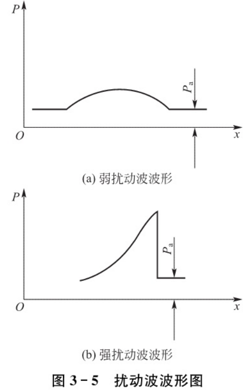
1. 波的分类和形成

波可分为有两大类，即机械波与电磁波。水波、声波等是机械波，也称为力学波，冲击波、爆轰波是机械波；光波、无线电波、X射线等是电磁波。

机械波必须在介质中传播，没有介质无法传播，在真空中不能传播任何机械波，但对电磁波的传播，介质不是必要的，如光波可以在真空中进行传播。机械波在介质中传播时，介质可产生塑性或弹性变形，相应地产生了弹性波和塑性波两类。按波内质点运动方向和波传播方向之间的关系，波可以分为纵波和横波，纵波使介质受到压缩或膨胀，横波在介质中引起切变。按波阵面的形状不同，波可以分为平面波、柱面波和球面波。

一般地说，波的形成是与扰动分不开的。所谓扰动，就是在受到外界作用(如振动、敲打、冲击等)时，介质状态(压力、温度、密度等)发生的局部变化。而波就是扰动的传播，换句话说，介质状态变化的传播即称为波。

介质的某个部位受到扰动后，便立即有波由近及远地逐层传播开去。因此，在扰动或波传播过程中，总存在着已受扰动区与未受扰动区的分界面，此分界面称为波阵面。波阵面的传播方向就是波的传播方向，波阵面的传播速度就是波的传播速度，简称为波速，单位为m/s或km/s。绝不可把波的传播与受扰动介质质点的运动混同起来。扰动前后状态参数变化量很微小的扰动称为弱扰动，如声波就是一种弱扰动。弱扰动的特点是，状态变化是微小的、逐渐的和连续的，其波形如图3-5(a)所示。与此相反，状态参数变化很剧




(a) 弱扰动波波形

(b) 强扰动波波形

**图 3－5　扰动波波形图**

烈，或介质状态是突跃变化的扰动称为强扰动，其波形如图 3－5(b)所示，冲击波就是一种强扰动波。

2. 音波

音波即声波，其传播速度称为音速。在这里不能把音波只理解为听觉范围内的波动，音波在研究波动现象时具有重要意义，它是介质的重要特性之一。

音波是介质的质点在其平衡位置上做往复式弹性振动所形成的，因此，音波是典型的弱扰动。音波是压缩波和膨胀波交替的波，在传播过程中，介质状态参数的变化是连续的和有节奏的；介质的质点只在其平衡位置上振动，不发生位移，音波经过后，介质便又回复到它原来的位置；音波是由弱扰动而产生的无限振幅波，其波阵面上介质的状态参数变化无限小，即音波对介质的压缩极小；音速的大小只取决于介质的状态，而与波的强度无关。

3. 压缩波和稀疏波

压缩波是指扰动波传播过后，压力 $P$、密度 $\rho$、温度 $T$ 等状态参数增加的波。其特点是压力 $P$、密度 $\rho$、温度 $T$ 增加，介质质点运动方向与波的传播方向一致。稀疏波是指介质状态参数压力 $P$、密度 $\rho$、温度 $T$ 均为下降的波，特点是质点的移动方向与波的传播方向相反，且为弱扰动。

在这里要注意介质质点运动与波的传播有着本质的区别。所谓质点的运动，是指物质的分子或质子所发生的位移，而波的传播是弱扰动状态的传播，即波的传播是由介质的移动而引起的。这两个概念是必须区分的，例如，声带振动形成音波，音波在空气中以音速传至耳膜处，但绝不是声带附近的空气分子也移动到耳膜处了。



## 3.3.2　冲击波的基本知识

1. 冲击波的形成

冲击波是指在介质中以超声速传播并能引起介质的状态参数(如压力、密度和温度)发生突跃升高的一种特殊形式的压缩波。

为了形象地说明冲击波的形成过程和有关特性，下面以一维管道中的活塞运动来说明冲击波形成的物理过程，如图 3－6 所示。

设有无限长管子，左侧有一活塞。在 $t=0$ 时，活塞静止，位于管道的 0—0 处，管中气体未受扰动，初始状态参数为 $P_0$，$\rho_0$，$T_0$。假定从 $t=0$ 到 $t=\tau$ 时刻，活塞速度由 0 加速到 $\omega$ 时出现冲击波，状态参数为 $P_1$，$\rho_1$，$T_1$。

对每个小的 $d\tau$ 时刻时，介质状态参数只发生 $dP$、$d\rho$、$dT$ 变化，当 $t=d\tau$ 时，活塞以 $d\omega$ 推进到 1—1 处，活塞前气体受到弱压缩，产生第一道弱压缩波，波后状态为 $P_0+dP$，$\rho_0+d\rho$，$T_0+dT$，声波传播速度为 $C_0$。

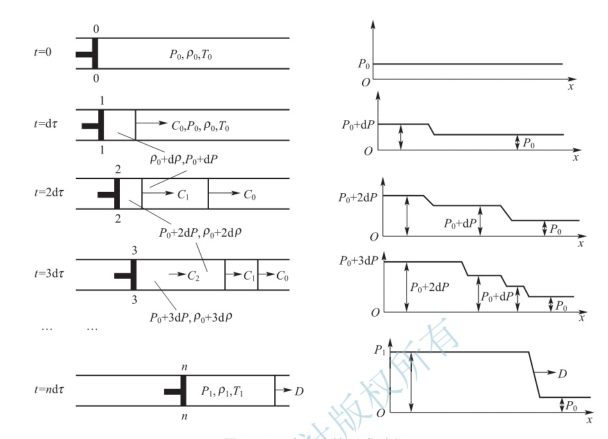



图 3－6 冲击波的形成过程

当 $t=2\mathrm{d}\tau$，活塞运动道 2—2 处，产生第二道压缩波，该波在已压缩过的气体($P_0+\mathrm{d}P$，$\rho_0+\mathrm{d}\rho$)中传播，波速为 $C_1$，显然，$C_1>C_0$，即第二道压缩波比第一道波快，终就会赶上第一道波，从而叠加成更强的压缩波。

当 $t=n\mathrm{d}\tau$ 时，活塞前气体将产生一系列弱压缩波，而后一道波总是比前一道波传播的快，从而叠加形成强的压缩波——即形成了冲击波。

以上过程说明，在空气中运动的物体要形成冲击波，其运动速度必须超过(或接近)空气中的音速。这是因为在封闭的管道中，介质状态参数的变化很容易积累起来而形成冲击波(因为活塞将活塞后的膨胀区与活塞前的压缩区隔离开了)，而物体在(例如弹丸)在三维的空间运动时，若其速度低于空气中的音速，则前面的压缩波以空气中的音速传播，物体向前运动的同时，周围空气则向其后的真空地带膨胀，形成膨胀波，使得运动物体前方空气的压缩状态不能叠加起来，所形成的压缩不总是以未扰动空气中的音速传播，故不能形成冲击波。当物体的运动速度超过当地空气中的音速时前面的空气来不及“让开”，即空气的状态参数来不及均匀化(膨胀波以音速传播)，突然受到运动物体的压缩，能形成冲击波。

总之，冲击波是由压缩波叠加而成的，压缩波叠加形成冲击波是一个由量变到质变的过程，二者的性质有根本的区别。弱压缩波通过时，介质的状态发生连续变化，而冲击波通过时，介质状态参数发生突跃变化。

2. 冲击波的基本关系式

设冲击波传播速度为 $D$，下标为 0 的表示波前参数，下标为 1 的表示波后参数，$P$、$T$、$e$、$u$、$\rho$ 为介质的压力、温度、内能、质点速度或气流速度和密度，将坐标系建立在波阵面上，令波阵面右侧的未扰动介质以速度 $U_0=D-u_0$ 向左流入波阵面，而波后已扰

动介质以速度 $U_1=D-u_1$ 由波阵面向左流出。波阵面面积取一单位，按质量守恒原理，单位时间内从波面右侧流入的介质量等于从左侧流出的量，由此得

$$\rho_0(D-u_0)=\rho_1(D-u_1) \tag{3-6}$$

此即质量守恒方程或称为连续方程。在 $u_0=0$ 的条件下，式(3-6)简化为

$$\rho_0 D=\rho_1(D-u_1) \tag{3-7}$$

按照动量守恒定律，冲击波传播过程中，单位时间内作用于介质的冲量等于其动量的改变。其中，单位时间内的冲量为$(P_1-P_0)$，而介质动量的变化为 $\rho_0(D-u_0)(u_1-u_0)$。因此得到

$$P_1-P_0=\rho_0(D-u_0)(u_1-u_0) \tag{3-8}$$

在 $u_0=0$ 的条件下，式(3-8)可简化为

$$P_1-P_0=\rho_0 Du_1 \tag{3-9}$$

式(3-9)即为波的动量守恒方程或运动方程。

将式(3-7)和式(3-9)联立求解，并利用 $\rho=1/V$($V$ 为比容)的关系，可导出下面两个用扰动前与后的状态参量 $P_1$、$V_1$、$P_0$、$V_0$ 来表示的 $D$ 和 $u_1$ 的方程

$$D=V_0\sqrt{\frac{P_1-P_0}{V_0-V_1}} \tag{3-10}$$

$$u_1=(V_0-V_1)\sqrt{\frac{P_1-P_0}{V_0-V_1}} \tag{3-11}$$

式(3-10)、式(3-11)称为李曼方程，是扰动传播的基本方程。

根据能量守恒定律，可建立另外一个基本方程。因在波的传播过程中，单位时间从波面右侧流入的能量应等于从波左侧流出的能量，能量包括介质所具有的内能、压力位能和介质流动动能。因此，能量守恒方程为

$$P_1(D-u_1)+\rho_1(D-u_1)\left[E_1+\frac{(D-u_1)^2}{2}\right]=P_0(D-u_0)+\rho_0(D-u_0)\left[E_0+\frac{(D-u_0)^2}{2}\right] \tag{3-12}$$

在 $u_0=0$ 的条件下，并将李曼方程式(3-10)、(3-11)代入并整理后可导出波后的内能变化为

$$E_1-E_0=\frac{1}{2}(P_1+P_0)(V_0-V_1) \tag{3-13}$$

式(3-13)称为冲击绝热方程或雨果尼奥方程。

以上 3 个基本方程：连续方程、运动方程和能量方程，为冲击波的基本关系式方程。

如果介质为理想气体，由热力学的基本知识有以下关系：$E=c_v T$，$PV=nRT$，$K=c_p/c_v$，其中 $K$ 称为等熵指数，其值为定压比热 $c_p$ 与定容比热 $c_v$ 之比。由此可导出 $E=\frac{PV}{(K-1)}$，并代入式(3-13)有

$$\frac{P_1V_1}{K_1-1}-\frac{P_0V_0}{K_0-1}=\frac{1}{2}(P_1+P_0)(V_0-V_1) \tag{3-14}$$

一般情况下，$K=K_0$，变换上式得理想气体的雨果尼奥方程为

$$\frac{P_1}{P_0}=\frac{(K+1)\rho_1-(K-1)\rho_0}{(K+1)\rho_0-(K-1)\rho_1} \tag{3-15}$$

或

$$\frac{P_1}{P_0}=\frac{(K+1)\rho_1+(K-1)\rho_0}{(K+1)\rho_0+(K-1)\rho_1} \tag{3-16}$$

若已知状态函数 $E=E(P, V)$，就能将冲击绝热线方程表示为 $P$、$V$ 间关系的方程。该方程在 $P-V$ 坐标面内为一条通过 $P_0$、$V_0$ 点的曲线(图3-7)。对于理想气体的冲击绝热线可由式(3-15)在 $P-V$ 坐标面上画出。

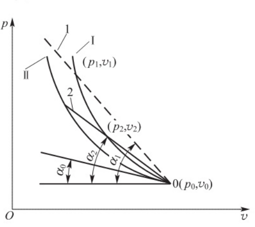



**图3-7 冲击绝热和波速关系曲线**

Ⅰ—冲击绝热曲线；

Ⅱ—等熵绝热曲线；1、2—波速线

若介质的初始状态为 $P_0$、$V_0$，则经过冲击波压缩后的介质状态 $P_1$、$V_1$ 必然落在通过 $P_0$ 和 $V_0$ 点的冲击绝热曲线上。但必须指出，冲击压缩时，由 $P_0$、$V_0$ 点变化到 $P_1$ 和 $V_1$ 并不沿着冲击绝热曲线进行，而是突变的。因此，冲击绝热曲线只代表冲击压缩后可能达到的那些状态，而不反映状态变化的过程。其物理意义为：冲击波的冲击绝热曲线不是过程线，而是不同波速的冲击波传过具有同一初态($P_0$，$V_0$)的介质后达到的终点状态的连线。

将式(3-10)画在同样的 $P-V$ 坐标上，得到一条直线，称为波速线。又称为冲击波的米海尔松直线，其角度系数为

$$\tan\alpha=\frac{D^2}{{V_0}^2}=\frac{P-P_0}{V_0-V} \tag{3-17}$$

冲击波的冲击绝热线是不同波速的冲击波传过同一初始状态 $0(P_0, V_0)$的同一种介质后所到达的终点状态的连线，而不是过程线。冲击波的波速线乃是相同的冲击波传过具有同一初始状态的不同介质所达到的终点状态的连线。因冲击波压缩后的介质既要满足冲击绝热曲线方程又要满足波速线方程，因此其介质状态由冲击绝热线和波速线交点坐标确定。

冲击波衰减成音波后，波速线将在介质初始状态点($P_0$，$V_0$)与冲击绝热线相切，($\alpha=\alpha_0$)，同时也与通过该点的等熵绝热曲线相切。这条切线代表未扰动介质中的音速。

3. 气体中的空气冲击波参数

由冲击波的3个基本方程组，若已知 $E=E(P, V)$，则有4个基本未知参数 $D$、$u$、$\rho$、$P$。因此，若能给出其中一个参数(通常为波速或压力，因其值容易测定)，就能将其他参数求出。

若近似将气体看成是理想气体，则由李曼方程(3-10)、(3-11)和理想气体中的冲击绝热方程式(3-15)，经代数变换可得到

$$u_1=\frac{2}{K+1}D\left(1-\frac{1}{M^2}\right) \tag{3-18}$$

$$P_1-P_0=\frac{2}{K+1}\rho_0 D^2\left(1-\frac{1}{M^2}\right) \tag{3-19}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_1}=\frac{K-1}{K+1}+\frac{2}{(K+1)M^2} \tag{3-20}$$

式中，$M=D/c_0$——以未扰动气体中的音速为单位的冲击波波速，称为马赫数。

绝热指数 $K=\frac{c_p}{c_v}=1+\frac{R}{c_v}$，其值为：单原子气体 $K=5/3$；双原子气体 $K=1.4$；三原

子气体 $K=1.25$；对于强冲击波 $P<5\text{MPa}$，$K=1.4$；对于空气，当温度 $T$ 在 273～3000K 范围内时，$c_v=4.78+0.45\times10^{-3}T$。

利用理想气体的状态方程 $PV=nRT$，得冲击波压缩后气体的温度

$$\frac{T_1}{T_0}=\frac{P_1}{P_0}\frac{(K+1)P_0+(K-1)P_1}{(K+1)P_1+(K-1)P_0} \tag{3-21}$$

对于强冲击波($P_1\gg P_0$)，$1/M^2$ 和 $P_0$ 均可忽略不计。因此，冲击波参数计算公式可简化为下列形式

$$u_1=\frac{2}{K+1}D \tag{3-22}$$

$$P_1=\frac{2}{K+1}\rho_0 D^2 \tag{3-23}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_1}=\frac{K-1}{K+1} \tag{3-24}$$

$$\frac{T_1}{T_0}=\frac{P_1}{P_0}\frac{(K-1)}{(K+1)} \tag{3-25}$$

4. 冲击波的特性

分析冲击波的基本关系式，可概括出击波的基本特性有以下几个。

(1) 冲击波的波速对未扰动介质是超声速，对已扰动介质而言则是亚音速的。

(2) 冲击波的速度同波的强度有关，波的强度越大，波速越大。

(3) 介质受到冲击波压缩时，波阵面上的介质状态参数突跃变化。

(4) 波阵面上质点运动方向与波传播方向一致，但其速度小于波速，因此在冲击波后伴随有稀疏波。

(5) 波在介质中传播强度逐渐衰减，最终衰减成为音波。

(6) 冲击波是一种脉冲波，不具有周期性。



### 3.3.3 炸药的爆轰理论

1. 爆轰波及其结构

1) 爆轰波的定义

通常把这种在炸药中传播并伴随有高速化学反应的冲击波叫做爆轰波，也称为反应性冲击波或自持性冲击波。这个过程叫做爆轰过程。爆轰波具有冲击波的一般特性，但由于伴随有炸药的化学反应，反应释放出的能量支持冲击波的传播，补偿冲击波再传播中的能量衰减，因此，爆轰波具有传播速度稳定的特点。爆轰波传播的速度称为爆速。爆速是炸药爆轰的一个重要参数。

2) 爆轰波的 C-J 模型

该模型由查普曼(Chapman)与朱格(Jouguet)提出，后称为 C-J 理论。C-J 理论的基本假定：冲击波与化学反应区作为一维间断面处理，反应在瞬间完成，化学反应速度无穷大，反应的初态和终态重合(图 3-8)。流动或爆轰波的传播是定常的。C-J假设把爆轰过

程和爆燃过程简化为一个含化学反应的一维定常传播的强间断面，对于爆轰过程，该强间断面为爆轰波，对于爆燃过程则叫做爆燃波。将爆轰波或爆燃波简化为含化学反应的强间断面的理论通常称为Chapman－Jouguet 理论，简称 C－J 理论。

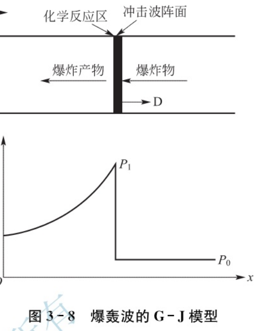



图 3－8 爆轰波的 G－J 模型

3）爆轰波的 Z－N－D 模型

C－J 理论将爆轰波当作一个包含化学反应的强间断面，实际上就是不考虑爆轰波中化学反应区的结构，这个理论模型不仅使一个极为复杂的爆轰过程得到大大简化，而且实验证明，在处理一些具体爆轰问题时也常常得到满意的结果。但爆轰毕竟是有化学反应的过程，化学反应不可能瞬间完成，在一定的化学反应速度下，必然有一个原始炸药变成爆轰反应产物的化学反应区，对一般高效炸药，反应区宽度几毫米数量级。鉴于这种实际情况，科学工作者对 C－J 理论进行了修正，提出了新的爆轰波结构的理论，即所谓的Z－N－D模型。

Z－N－D 模型把爆轰波看作由一个前沿冲击波和一个化学反应区构成，未反应的炸药先在冲击作用下变得高温、高密度，然后以有限速率的化学反应，经过一个连续的化学反应区变成终态的爆轰产物。在化学反应区内，由于化学反应和放出热量，介质的状态参数将发生相应的变化，与冲击波头相比较，压力逐渐下降，比容和温度逐渐增加，当反应结束时，因放热量减少，温度开始下降。因此化学反应区内不同截面上的状态参数是不同的。对于冲击波，由于波阵面很窄，在其间炸药来不及发生化学反应，仍然作为一个强间断面。从前沿冲击波强间断面到化学反应终了处的整个区间，构成了爆轰波的完整结构，并以同一速度沿爆炸物传播，如图 3－9 所示，图中爆轰波最前端的压力为冲击波压力 $P_z$，炸药在受到 $P_z$ 作用下，开始进行化学反应。化学反应结束时爆轰波的压力为 $P_H$。

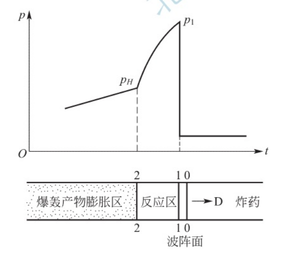



图 3－9 爆轰波的 Z－N－D 模型

Z－N－D 模型在物理上是合理的，比 C－J 模型前进了一步。但是它仍然假定流动是一维的，忽略黏性和热传导等耗散效应；并认为反应区内只有一个反应。即 A→B 的单一的不可逆反应形式，这个反应以单一向前的有限速率进行，一直进行到底，直到炸药全部变成爆轰产物为止；而且还认为，反应区内除了化学反应外，各处均处于局部热力学平衡状态。

2. 爆轰过程

在冲击波的高压作用下，相邻于冲击波的炸药层出现一个压缩区 0－1(图 3－10)，其厚度约 5～10cm，在这里，压力、密度、温度都呈突跃升高状态，实际上，就是冲击波的波阵面。随着冲击波的传播，新压缩区的产生，原压缩区成为化学反应区，反应在 1－1

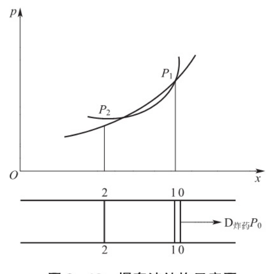


图 3-10　爆轰波结构示意图

面开始发生，在 2-2 面完毕；再随着冲击波的前进，新的化学反应区的形成，原化学反应区又成为反应产物膨胀区。化学反应放出的能量，不断维持着波阵面上参数的稳定，其余在膨胀区消耗掉，因而达到能量平衡，冲击波即以稳定速度向前传播。这就是爆轰过程的实质。由此可见以下几点。

（1）爆轰波只存在于炸药的爆轰过程中。爆轰波的传播随着炸药爆轰结束而中止。

（2）爆轰波总带着一个化学反应区，它是爆轰波得以稳定传播的基本保证。习惯上把 0-2 区间称为爆轰波波阵面的宽度，其数值约 0.1～1.0cm，视炸药的种类而异。通常把 2-2 面的参数作为爆轰波的参数。

（3）爆轰波具有稳定性，即波阵面上的参数及其宽度不随时间而变化，直至爆轰终了。

（4）0-0 面之前，炸药未受扰动。0-0 面和 1-1 面之间，炸药被压缩，但尚未开始反应，因其厚度和一个分子的自由路程同数量级，故忽略称 0-1 面。1-1 面和 2-2 面之间是化学反应区，化学反应区的宽度单质炸药为 0.1～1mm，混合炸药在 2～3mm 以上。2-2 面后是爆轰产物区，2-2 面为化学反应结束面，称为爆轰波波阵面。

3. 爆轰波的方程及传播的稳定性条件

以流体动力学为基础，同样可以建立起爆轰波参数的关系式。假定爆轰波的传播过程是绝热的，则爆轰波内的物质应符合质量守恒、动量守恒和能量守恒定律，这样可以得出与冲击波相同的基本方程



$$D_H=V_0\sqrt{\frac{P_H-P_0}{V_0-V_H}} \tag{3-26}$$

$$u_H=\sqrt{(P_H-P_0)(V_0-V_H)} \tag{3-27}$$

只是能量方程有些差别，因为在 C-J 面上的炸药已反应完毕变为爆轰产物，其内能已减少，有一部分已变成化学反应方程的热量，即爆热 $Q_v$，因此能量方程变为

$$E_H-E_0=\frac{1}{2}(P_H+P_0)(V_0-V_H)+Q_v \tag{3-28}$$

在冲击波头上，炸药受到冲击压缩，但尚未发生化学反应，没有热量放出，故冲击波头的能量方程为

$$E_z-E_0=\frac{1}{2}(P_z+P_0)(V_0-V_z) \tag{3-29}$$

式(3-28)称为雨果尼奥方程，将雨果尼奥方程画在 $p-v$ 坐标中，得到爆轰波的雨果尼奥曲线，如图 3-11 所示。

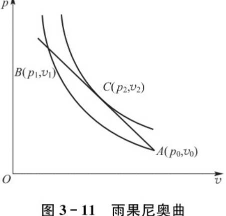


图 3-11　雨果尼奥曲线与波速线的关系

在同一坐标中，画出前沿冲击波的曲线。从 $A(p_0, v_0)$做爆轰波波速线，如图 3-11 所示，查普曼和朱格认为：当爆轰波定型传播时，在爆轰波雨果尼奥曲线上只有一点与爆轰过程相对应，这一点就是与之相切的点

$C(p_2, v_2)$，$C$ 点就是 C－J 面上的状态参数，而与冲击波曲线的交点 $B(p_1, v_1)$ 即是前沿冲击波的波阵面参数。以上这个条件就是爆轰波稳定传播的条件，又叫 C－J 条件 。C－J 条件也可以用下式来表示：$D=c_H+u_H$。在化学反应区后面，炸药爆炸后，气体质点膨胀，压力下降，说明有一个稀疏波跟在反应区的后面。

由于稀疏波和化学反应区都以当地音速$(u+c)$的速度跟随在冲击波头后传播，如果$u+c>D$，稀疏波就会侵入反应区，减少对冲击波的能量补充，使爆轰波不能稳定传播而降低爆速；如果 $u+c<D$，由于连续性原因，反应区内也有部分区域存在 $u+c<D$ 的情况，这部分区域释放的化学能不可能传到冲击波头上，故从支持冲击波头能量的观点来看，它是无效的，结果使爆轰波不能稳定传播而降低爆速；因此只有 $D=c_H+u_H$ 才是爆轰波稳定传播的条件，即满足 C－J 条件。

4. 爆轰参数计算

1）气体炸药的爆轰波参数计算

根据 C－J 理论，得到气体炸药的爆轰波参数公式如下

$$D_H=\sqrt{2(K^2-1)Q_v} \tag{3-30}$$

$$P_H=\frac{1}{K+1}\rho_0 D_H^2 \tag{3-31}$$

$$\rho_H=\frac{K+1}{K}\rho_0 \tag{3-32}$$

$$u_H=\frac{1}{K+1}D_H \tag{3-33}$$

$$c_H=\frac{K}{K+1}D_H \tag{3-34}$$

式中，$D_H$——爆速，m/s；

$K$——气体的等熵指数；

$Q_v$——爆热，kJ/kg；

$\rho_0$——炸药初始密度，$g/cm^3$；

$P_H$——C－J 面处爆轰波压；

$\rho_H$——炸药在 C－J 面的密度；

$u_H$——爆轰产物在 C－J 面的质点速度；

$c_H$——爆轰产物的 C－J 面的音速。

2）凝聚炸药爆轰波参数计算

凝聚炸药的密度比气体炸药大，其爆轰产物的密度也大得多，此时理想气体的状态方程已不适应。为此许多研究者提出了许多凝聚体炸药爆轰产物的状态方程式，对其爆轰参数进行理论计算。通常的近似计算采用式(3－35)作为凝聚炸药爆轰产物的近似状态方程：

$$PV^r=A \tag{3-35}$$

式中，$A$——与炸药性质有关的常数；

$r$——凝聚体炸药的多方指数。

经推导得到凝聚炸药爆轰波参数的计算公式如下

$$D_H=\sqrt{2(r^2-1)Q_v} \tag{3-36}$$

$$P_H=\frac{1}{r+1}\rho_0 D_H^2 \tag{3-37}$$

$$\rho_H=\frac{r+1}{r}\rho_0 \tag{3-38}$$

$$u_H=\frac{1}{r+1}D_H \tag{3-39}$$

$$c_H=\frac{r}{r+1}D_H \tag{3-40}$$

式中，各参数的意义与气体炸药爆轰波的参数相同。

凝聚炸药爆轰产物的多方指数 $r$ 可近似地按式(3-41)确定，即

$$\frac{1}{r}=\sum\frac{x_i}{r_i} \tag{3-41}$$

式中，$x_i$——爆轰产物中第 $i$ 种成分的克分子数；

$r_i$——爆轰产物第 $i$ 种成分的多方指数。

凝聚炸药各主要产物成分的多方指数分别为

$$r_{H_2O}=1.9,\ r_{CO_2}=4.5,\ r_{CO}=2.85,\ r_{O_2}=2.45,\ r_{N_2}=3.7,\ r_C=3.35$$

也有人提出了如下的经验公式

$$r=1.9+0.6\rho_0 \tag{3-42}$$

式中，$\rho_0$——炸药的初始密度。

对于许多高密度的凝聚炸药而言，取 $r=3$，可以说是一个很好的近似。这样可以得到如下简明的结果

$$D_H=4\sqrt{Q_v} \tag{3-43}$$

$$P_H=\frac{1}{4}\rho_0 D_H{}^2 \tag{3-44}$$

$$\rho_H=\frac{4}{3}\rho_0 \tag{3-45}$$

$$u_H=\frac{1}{4}D_H \tag{3-46}$$

$$c_H=\frac{3}{4}D_H \tag{3-47}$$

3）瞬态爆轰参数速计算

瞬时爆轰是一种假设的极限情况，即假设爆速无穷大，炸药爆轰完了瞬间，产物来不及膨胀($u=0$，$\rho=\rho_0$)，因此，瞬时爆轰也叫定容爆轰，而且产物中 $P$、$\rho$、$c$、$u$ 等都是均匀分布的。其爆轰参数为

$$\overline{P}=\frac{1}{2}P_H=\frac{1}{2(K+1)}\rho D_H \tag{3-48}$$

$$\bar{\rho}=\rho_0,\quad \bar{u}=0 \tag{3-49}$$

$$\bar{c}=D_H\sqrt{\frac{K}{2(K+1)}} \tag{3-50}$$

式中，$\bar{p}$、$\bar{\rho}$、$\bar{u}$、$\overline{C}$——瞬时爆轰参数。

4）计算爆速的经验公式

根据炸药爆热估算爆速

$$D_H = D_{H.TNT}\sqrt{Q_v/Q_{v.TNT}} \qquad (3-51)$$

式中，$D_H$——任何一种炸药的密度为 $\xi_0$ 时的爆速；

$Q_v$——该炸药的爆热；

$D_{H.TNT}$——在同样密度条件下，TNT 的爆速；

$Q_{H.TNT}$——在同样密度条件下，TNT 的爆热。

TNT 炸药在任意密度时的爆速和爆热可按下列经验式估算

$$D_{H.TNT} = 1800 + 3230\rho_0 \quad (\mathrm{m/s}) \qquad (3-52)$$

$$D_{H.TNT} = 4202 + 1034(\rho_0 - 1) \quad (\mathrm{kJ/kg}) \qquad (3-53)$$

**【例题 2】** 已知 2 号岩石炸药的实测爆速 D=3600m/s，炸药密度 $\rho_0=1\mathrm{g/cm^3}$。计算炸药爆轰参数。

**【解答】**

$$P_H = \frac{1}{4}\rho_0 D^2 = \frac{1}{4}\times 1\times 3600^2\times 10^3 = 3240(\mathrm{MPa})$$

$$\rho_H = \frac{4}{3}\rho_0 = \frac{4}{3}\times 1 = 1.33(\mathrm{g/cm^3})$$

$$u_H = \frac{1}{4}D = \frac{1}{4}\times 3600 = 900(\mathrm{m/s})$$

$$c_H = D - u_H = 3600 - 900 = 2700(\mathrm{m/s})$$

5. 爆速及其影响因素

爆速是一个重要的爆轰参数，它是计算其他爆轰参数的依据，也可以说爆速间接地表示出其他爆轰参数值，反映了炸药爆轰的性能。因此研究爆速有着重要的意义。

炸药理想爆速主要取决于炸药密度、爆轰产物组成和爆热。从理论上讲，仅当药柱为理想封闭、爆破产物不发生径向流动、炸药在冲击波波阵面后反应区释放出的能量全部都用来支持冲击波的传播、爆轰波以最大速度传播时，才能达到理想爆速。实际上炸药是很难达到理想爆速的，炸药的实际爆速都低于理想爆速。爆速除了与炸药本身的化学性质如爆热、化学反应速度有关外，还受装药直径、装药密度和粒度、装药外壳、起爆冲能及传爆条件等影响。

1）装药直径的影响

炸药的装药直径对爆轰传播过程有很大的影响，只有当炸药的装药直径达到某一临界值时，爆轰才有可能稳定传播。习惯上称能够稳定传播爆轰的最小装药直径为临界直径，用 $d_{cr}$ 来表示；对应于临界直径的爆速为临界爆速，用 $D_{cr}$ 来表示。若装药直径小于其临界直径时，则无论起爆冲量多强，炸药均不能达到稳定爆轰。习惯上称炸药装药的爆速达到最大值时的最小装药直径为极限直径，用 $d_m$ 来表示；对应于极限直径的爆速极大值称为极限爆速，用 $D_m$ 来表示。炸药的爆速与装药直径的关系如图 3-12 所示。

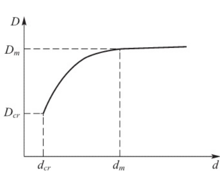



图 3-12 爆速与装药直径的关系图

从图中可以看出，随着直径的增加，爆速增加较快，但超过某一界限时，达到稳定爆轰状态，爆速为一常数。为了保证炸药能稳定爆轰，实际应用中的装药直径必须大于炸药的临界直径。临界直径与炸药化学本质有很大关系：起爆药的临界直径最小，一般为 $10^{-2}$mm 量级；其次为高猛单质炸药，一般为几个毫米；硝酸铵和硝铵类混合炸药的临界直径则较大，硝酸铵可达 100mm，而

铵梯炸药一般为 12～15mm。

对于工业炸药而言，由于它们的极限直径很大，临界直径较小（如 $\rho_0 = 1.0 g/cm^{-3}$ 的 2 号岩石炸药的 $d_m$ 约为 100mm 左右，$d_{cr}$ 约为 20mm），而实际使用过程中的装药直径一般处于临界直径以上和极限直径以下，此时，炸药发生稳定爆轰的爆速是难以达到极限爆速的，因此爆轰是非理想的。于是非理想爆轰即指装药直径在 $d_{cr}$ 与 $d_m$ 之间的稳定爆轰，而处于 $d_m$ 以上的爆轰可以看成是理想爆轰。

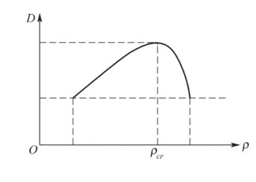


图 3－13　炸药密度对爆速的影响

2）装药密度的影响

炸药的密度越大，某些炸药的爆速和爆压随密度增大而增大，使临界直径和极限直径减小。对于其他一些炸药，由于随着装药密度的增加，使炸药各组分或其他分解产物之间的渗透和扩散作用更加困难，结果反应速度降低，临界直径增大。图 3－13 表明，当装药密度达到最佳密度后，再继续增大装药密度，就会导致爆速下降，当爆速下降到临界爆速，或临界直径增大到药柱直径时，爆轰波就不能稳定传播，最终导致熄爆。

3）炸药粒度的影响

一般情况下，对于单质炸药，炸药粒度越细，临界直径和极限直径就越小，爆速越大；对于混合炸药，其敏感成分的粒度越细，临界直径越小，爆速越高；而对于钝感成分的粒度越细，临界直径增大，爆速也相应减小，但粒度细到一定程度后，临界直径又随粒度减小而减小，爆速也相应增大。

4）装药外壳的影响

有外壳或在炮孔内的装药比无外壳的或不在炮孔内的装药，临界直径和极限直径均减小。这是因为装药外壳或炮孔可以限制炸药爆轰时反应区爆轰产物的侧向飞散，从而减小炸药的临界直径。

5）起爆冲能的影响

起爆冲能不会影响炸药的理想爆速，但要使炸药达到稳定爆轰，必须供给足够的起爆能，且激发冲击波波速必须大于炸药的临界爆速。

试验研究表明：起爆能量的强弱能够使炸药形成差别很大的高爆速或低爆速稳定的传播，其中高爆速即是炸药的正常爆轰速度。低爆速现象形成的原因是炸药起爆能较低时，不能产生爆轰反应，而其中的空隙和气泡受到绝热压缩形成热点，使部分炸药进行反应并支持冲击波的传播，从而形成炸药的低爆速。

6）间隙效应

对于细长连续装药的混合炸药（如硝铵类），通常在空气中都能正常传爆，但在炮孔中，如果药包与炮孔孔壁之间存在间隙，常出现爆轰中断或转变为燃烧的现象，这种现象称为间隙效应或管道效应或沟槽效应。这种现象出现的条件为：浅孔，间隙为 10～15mm 时易出现，炸药的外壳越坚固、质量越大，效应越明显。产生的影响有：沟槽效应造成爆后残眼内留有残药，影响爆破效果。对于在瓦斯隧道内进行的爆破作业，若炸药由爆轰转变为燃烧，就有可能引发瓦斯爆炸事故。关于沟槽效应产生的原因，目前有以下两种比较流行的解释。

（1）空气冲击波作用机理。通过超高速扫描摄影机对聚乙烯塑料管内药柱（35％硝化甘油胶质硝铵炸药，药柱直径为 25mm，管内径 27mm）爆轰过程的研究表明：当药柱爆轰

时，在空气间隙内产生超前于爆轰波传播的空气冲击波。空气冲击波作用机理认为：在空气冲击波压力作用下，炸药内产生自药柱表面向内部传播的压缩波，使药柱发生变形，压缩药柱表面形成锥形压缩区。炮孔内超前于爆轰波的空气冲击波存在有最大波长，因此在达到最大波长后，空气冲击波波头和爆轰波波头将以相同的速度传播，并保持速度不变，达到稳定状态。但是，如果在未达到稳定状态之前，药柱的有效直径已减小到炸药的临界直径，爆轰就会中断，如图 3-14 所示。

(2) 等离子体作用机理。美国埃列克化学公司的 M·A·库克和 L·L·尤迪等人采用等离子体探针试验装置，对沟槽效应进行了一系列研究。他们认为，沟槽效应是由炸药爆轰产生的等离子体引起的。炸药起爆后，在爆轰波阵面的前方有一等离子层（离子光波），对爆轰波前方未反应的药卷表层产生压缩作用，妨碍该层炸药的完全反应。

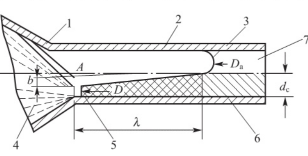



**图 3-14 间隙效应使药柱发生的变形**

1—产物前沿阵面；2—管壁；3—空气冲击波；4—爆轰产物；5—爆轰波头；6—未压缩炸药；7—间隙

等离子波阵面和爆轰波阵面分开的越大，或者等离子波越强烈，炸药表层被穿透的就越深，能量衰减的就越大。随着等离子波的进一步增强，就会引起药包爆轰的熄灭。

7) 消除沟槽效应和防止爆轰中断的措施

(1) 采用耦合散装炸药消除径向间隙，可以从根本上克服沟槽效应。

(2) 沿药卷全长布设导爆索，可以有效地起爆炮眼内的细长排列的所有药卷。

(3) 每装数个药包后，装 1 个能填实炮孔的大直径药包，以阻止空气冲击波或等离子体的超前传播。

(4) 给药卷套上由硬纸板或其他材料做成的隔环，其外径稍小于炮眼直径，将间隙隔断，以阻止间隙内空气冲击波的传播或削弱其强度。

(5) 选用不同的包装涂覆物，如柏油沥青、石蜡、蜂蜡等，可以削弱或消除沟槽效应。

(6) 采用临界直径小，对沟槽效应抵抗能力大的炸药。与混合炸药不同，多数单质炸药在增大炸药密度后，能够提高爆速并减小临界直径，所以沟槽效应对多数单质炸药起着有利于爆轰传播的作用。实践证明，水胶炸药和乳化炸药对沟槽效应有较强的抵抗能力。

关于沟槽效应产生的理论解释，目前还不很成熟，还在进一步的研究中；但如何防止这种效应的产生则是爆破工程中重要的实际问题，进一步的试验研究也是极为必要的课题。

# 3.4 炸药的氧平衡

## 3.4.1 炸药的氧平衡概述

1. 炸药的氧平衡及氧系数

炸药的氧平衡是指炸药内含氧量与可燃元素充分氧化所需氧量之间的关系。氧平衡用

每克炸药中剩余或不足氧量的克数或百分数来表示。氧系数是指炸药中含氧量与可燃元素充分氧化所需氧量之比，用它也可以表示氧平衡关系。含氧量有多余时称为正氧平衡，不足时称为负氧平衡，相等时称为零氧平衡。

炸药主要是由 C、H、O、N 这 4 种元素组成的，其分子式可以写成通式 $C_aH_bN_cO_d$。单质炸药的通式通常按 1mol 写出，混合炸药则按 1kg 写出。

炸药爆炸过程，实质上是炸药的可燃元素 C、H 和氧元素之间的氧化生成新的稳定化合物，并且放出大量热的化学转化过程。所以，所谓氧平衡，是指炸药爆炸时，单位质量炸药中所含的氧将 C、H 元素完全氧化为 $CO_2$，$H_2O$ 和其他元素的高级氧化物，氮和多余的游离氧。若氧量不足，在生成产物中，除 $CO_2$、$H_2O$、$N_2$ 外，还有 $H_2$、CO、固体碳和其他氧化不完全的产物。

2. 氧平衡及氧系数的计算

若炸药的通式为 $C_aH_bN_cO_d$，单质炸药的氧平衡的计算公式为

$$K_b=\frac{d-\left(2a+\frac{b}{2}\right)}{M}\times 16\times 100\% \tag{3-54}$$

式中，16——氧原子的摩尔质量；

$M$——炸药分子的摩尔质量；

$K_b$——炸药的氧平衡值。

若混合炸药的通式按 1kg 写出，则氧平衡计算公式为

$$K_b=\frac{d-\left(2a+\frac{b}{2}\right)}{1000}\times 16\times 100\% \tag{3-55}$$



混合炸药的氧平衡还可以通过炸药中各组分的氧平衡值与该组分的重量百分比乘积的代数和来计算，即

$$K=\sum K_iX_i \tag{3-56}$$

式中，$K_i$——某组分炸药的氧平衡值；

$X_i$——相应炸药组分的重量百分比。

一些炸药及常用组分的氧平衡见表 3-7。

炸药的氧系数 A 按式(3-57)计算

$$A=\frac{d}{\left(2a+\frac{b}{2}\right)}\times 100\% \tag{3-57}$$

**【例题 3】** 计算硝酸铵($NH_4NO_3$)的氧平衡值。

**【解答】** 硝酸铵的炸药通式为 $C_0H_4N_2O_3$，$M=80$。

$$K_b=\frac{\left[3-\left(0+\frac{4}{2}\right)\right]\times 16}{80}=+0.2(\mathrm{g/g})$$

**【例题 4】** 已知 2 号岩石铵梯炸药的配方为硝酸铵 85%，梯恩梯 11%，木粉 4%，计算 2 号岩石铵梯炸药的氧平衡值。

**【解答】** 由表 3-7 查得，硝酸铵、梯恩梯和木粉的氧平衡分别为 0.2、−0.74 和−1.37，由式(3-55)得

$$K_b = 0.2 \times 0.85 - 0.74 \times 0.11 - 1.37 \times 0.04 = 0.0338(g/g)$$

**表 3-7　一些炸药或炸药组分的分子式及氧平衡**

| 名称 | 分子式(或试验式) | 氧平衡(克/克炸药) |
|---|---|---|
| 硝基甲烷 | $CH_3NO_2$ | -0.395 |
| 三硝基萘 | $C_{10}H_6(NO_2)_3$ | -1.394 |
| 三硝基苯酚 PA(苦味酸) | $C_6H_2OH(NO_2)_3$ | -0.559 |
| 三硝基甲苯甲硝胺(特屈儿) | $C_6H_2(NO_2)_4NCH_3$ | -0.474 |
| 二硝基甲苯 DNT | $C_6H_3(NO_2)_2CH_3$ | -1.144 |
| 三硝基甲苯 TNT(梯恩梯) | $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ | -0.740 |
| 环三次三硝胺 RDX(黑索金) | $C_3H_6N_3(NO_2)_3$ | -0.216 |
| 环四次甲基四硝胺 HMX(奥托今) | $C_4H_8O_8N_8$ | -0.216 |
| 三硝酸丙三酯 NG(硝化甘油) | $C_3H_5(ONO_2)$ | +0.035 |
| 乙二醇 | $C_2H_4(OH)_2$ | -1.29 |
| 二硝化乙二醇 | $C_2H_4(ONO_2)_2$ | 0.000 |
| 硝化二乙二醇 | $C_4H_8O_7N_2$ | -0.408 |
| 四硝化戊四醇 PETN(泰安) | $C_5H_8(ONO_2)_4$ | -0.101 |
| 硝化棉 NC | $C_{24}H_{31}(ONO_2)_9O_{11}$ | -0.385 |
| 甲胺硝酸盐 | $CH_3NH_2HNO_3$ | -0.340 |
| 三甲胺硝酸盐 | $C_3H_{10}N_2O_3$ | -1.048 |
| 雷汞 MP | $Hg(ONC)_2$ | -11.84 |
| 叠氮化铅 LA | $Pb(N_3)_2$ | — |
| 三硝基碱苯二酚铅 T. H. C(斯蒂酚酸铅) | $C_6H(NO_2)_3O_2pb$ | -0.560 |
| 二甲基重氮酚 DDNP | $C_6H_2(NO_2)_2NON$ | -0.580 |
| 硝酸肼 | $N_2H_5NO_3$ | +0.084 |
| 硝酸钾 | $KNO_3$ | +0.396 |
| 硝酸钠 | $NaNO_3$ | +0.470 |
| 亚硝酸钠 | $NaNO_2$ | +0.348 |
| 硝酸钡 | $Ba(NO_3)_2$ | +0.306 |
| 硝酸铵 | $NH_4NO_3$ | +0.200 |
| 抗水硝酸铵 | — | +0.185 |
| 过氯酸铵 | $NH_4ClO_4$ | +0.340 |
| 过氯酸钾 | $KClO_4$ | +0.460 |
| 过滤酸钠 | $NaClO_4$ | +0.532 |
| 重铬酸钾 | $K_2Cr_2O_7$ | +0.082 |

（续）

| 名称 | 分子式(或试验式) | 氧平衡(克/克炸药) |
|---|---|---|
| 氯酸钾 | $KClO_3$ | +0.392 |
| 煤(含碳86%) | — | −2.599 |
| 尿素 | $CO(NH_2)_2$ | 0.80 |
| 木粉 | $C_{15}H_{22}O_{11}$ | −1.370 |
| 石蜡、凡士林 | $C_{18}H_{38}$ | −3.460 |
| 沥青 | $C_{30}H_{18}O$ | −2.760 |
| 轻柴油 | $C_{16}H_{32}$ | −3.420 |
| 矿物油(重油) | $C_{12}H_{26}$ | −3.500 |
| 植物油 | $C_{23}H_{36}O_7$ | −2.150 |
| 淀粉 | $(C_6H_{20}O_5)_n$ | −1.185 |
| 萘 | $C_{10}H_8$ | −3.000 |
| 硫 | S | −1.000 |
| 铝粉 | Al | −0.890 |
| 硅粉(含硅90%) | — | −1.070 |
| 纸 | — | −1.300 |
| 硬钙酸钙 | $C_{36}H_{70}O_4Ca$ | −2.750 |
| 纤维素 | $(C_6H_{10}O_5)_n$ | −1.185 |
| 豆饼粉 | — | −1.520 |
| 棉籽饼粉 | $C_{44}H_{72}O_{17}N_9$ | −1.520 |
| 碳酸钙 | $CaCO_3$ | 0.000 |
| 氯化钠 | NaCl | 0.000 |
| 氯化钾 | KCl | 0.000 |
| 十二烷基苯磺酸钠 | $C_{18}H_{20}O_3SNa$ | −2.30 |
| 硼砂 | $Na_2B_4O_7H_2O$ | 0.0 |
| 蔗糖 | $C_{12}H_{22}O_{11}$ | −1.122 |
| 白芨胶 | — | −1.066 |
| 槐豆胶 | $[C_6H_7O_2(OH)_3]_n$ | −1.185 |
| 田菁胶 | $C_{3.32}H_{5.9}O_{3.25}N_{0.084}$ | −1.014(含少量灰分) |
| 古尔胶(巴基斯坦) | $C_{3.18}H_{5.9}O_{3.27}N_{0.059}$ | −0.966(含少量灰分) |
| 古尔胶(加拿大) | $C_{3.21}H_{6.2}O_{3.38}N_{0.043}$ | −0.982(含少量灰分) |
| 糊精 | $(C_6H_{10}O_5)_n$ | −1.185 |
| 聚丙烯酰胺 | $(CH_2CHCONH_2)_2$ | −1.69 |
| 硬脂酸 | $C_{18}H_{36}O_2$ | −2.925 |

3. 氧平衡的分类及炸药配比计算

根据氧平衡值的大小，可将氧平衡分为正氧、负氧和零氧平衡3种类型。

(1) 正氧平衡($K_b>0$)。炸药中可燃元素完全氧化后氧还有剩余，这类炸药为正氧平衡炸药。正氧平衡炸药未能充分利用其中的氧量，且剩余的氧和游离氮化合时，将生成氮氧化物有毒气体，并吸收热量。

(2) 负氧平衡($K_b<0$)。若炸药中的氧不足以完全氧化可燃元素，这类炸药为负氧平衡炸药。这类炸药因含氧不足，未能充分利用可燃元素，放热量不充分，并且生成可燃性CO等有毒气体。

(3) 零氧平衡($K_b=0$)。若正好使可燃元素完全氧化的，这类炸药为零氧平衡炸药。零氧平衡炸药因氧和可燃性元素都能得到充分的利用，故在理想的条件下，能放出最大热量，而且不会生成有毒气体。

因此，在配制混合炸药时，通过调节其组成和配比，应使炸药的氧平衡接近于零氧平衡，这样可以充分利用炸药的能量和避免或减少有毒气体的产生。

确定含两种成分的混合炸药配比的方法如下：设炸药中氧化剂和可燃剂的配比分别为$x$、$y$，令$a$、$b$、$c$分别为这两种成分和混合后的氧平衡值，则有

$$\left.\begin{aligned} x+y&=100\% \\ ax+by&=c \end{aligned}\right\} \tag{3-58}$$

若按零氧平衡配制，则取$c=0$，可联立求解$x$、$y$。

若要配制3种成分的零氧平衡炸药时，若其配比分别为$x$，$y$，$z$，3种成分的氧平衡值分别为$a$、$b$、$c$，有

$$\left.\begin{aligned} x+y+z&=1 \\ ax+by+cz&=0 \end{aligned}\right\} \tag{3-59}$$

解以上方程组即可求各成分的配比。



### 3.4.2 炸药的爆炸反应方程式及爆轰产物

1. 炸药的爆炸反应方程式

由于爆炸反应本身是在高温高压条件下进行的，很难测定在瞬间的爆炸产物的组成，且产物受炸药本身的组分和配比、炸药密度、起爆条件、可逆二次反应等影响，因此很难精确确定爆炸产物组分，只能近似建立炸药的爆炸反应方程式。

为建立炸药的爆炸反应方程式，根据炸药内含氧量的多少，通常把通式为$C_aH_bN_cO_d$炸药分为3类：一类炸药为零氧或正氧平衡炸药$d\geqslant 2a+\frac{b}{2}$，第二类炸药为只生成气体产物的负氧平衡炸药$a+\frac{b}{2}\leqslant d<2a+\frac{b}{2}$，第三类炸药为可能生成固体碳的负氧平衡炸药$d<a+\frac{b}{2}$。下面介绍两种近似确定炸药爆炸反应方程式的方法。

(1) 按吕·查德里(Le Chatelier)方法确定爆炸反应方程式。该法的确定原则为：最大爆炸产物体积原则，并且在体积相同时，偏重于放热多的反应。这个原则及计算方法对于自

由膨胀的爆炸产物的最终状态比较适合，方法如下。

① 对第一类炸药，即零氧平衡和正氧平衡的炸药：$d \geqslant 2a+0.5b$，将 H 全部氧化为 $H_2O$，C 全部被氧化成 $CO_2$，并生成分子状态的 $N_2$，正氧平衡的炸药还剩分子状态的 $O_2$。

例如，硝化甘油炸药：$C_3H_5(ONO_2)_3 \rightarrow 2.5H_2O+3CO_2+1.5N_2+0.25O_2$。

② 对第二类炸药：其氧含量不足以氧化可燃元素，但能使产物完全气化，即爆炸产物中不含有固体 C，满足 $a+0.5b \leqslant d \leqslant 2a+0.5b$，即首先考虑对生成气体产物有利的反应，$C \rightarrow CO$，余下的氧将平均分配用于氧化 $CO \rightarrow CO_2$，$H_2 \rightarrow H_2O$，因此产物中的 $H_2O$ 与 $CO_2$ 的摩尔数是相同的。

例如，RDX：$C_3H_6O_6N_6 \rightarrow 1.5H_2O+1.5CO_2+1.5CO+3N_2$。

③ 对第三类炸药：这是严重负氧平衡的炸药，产物中有固体碳生成，满足 $d<a+0.5b$，此时 Le - Chatelier 规则已不适用，否则产物可能无 $H_2O$ 生成，这是不合理的。

改进方法为：先将 3/4H 氧化为 $H_2O$，剩余的氧平均分配用于氧化 C，使之生成 $CO_2$ 和 CO。显然 CO 的摩尔数是 $CO_2$ 的二倍，并有固体碳生成。

例如，TNT：$C_7H_5O_6N_3 \rightarrow 1.88H_2O+2.06CO+1.03CO_2+3.91C+0.62H_2+1.5N_2$。

(2) 按最大放热原则确定爆炸反应方程式。

① 对第一类炸药：与 Le - Chatelier 方法相同。

② 对第二类炸药：其含氧量不足以充分氧化可燃元素，但生成产物均为气体，无固体 C。建立这类炸药近似爆炸反应方程式的原则为：首先将 H 氧化成 $H_2O$，剩余的 O 再将 C 氧化成 CO，若还剩余 O，则再将 CO 氧化成 $CO_2$，而 N 以分子状态 $N_2$ 存在。

例如，泰安炸药 $C_5H_8(ONO_2)_4$ 的爆炸反应方程式为：第一步 $C_5H_8N_4O_{12}=4H_2O+5CO+1.5O_2+2N_2$；第二步 $C_5H_8N_4O_{12}=4H_2O+3CO_2+2CO+2N_2$。

③ 对于第三类炸药：由于严重缺氧，产物中有固体碳生成。该类炸药爆炸反应方程式的原则是：首先 H 全部氧化为 $H_2O$，多余的氧使一部分 C 氧化为 CO，剩余的 C 游离出来。

例如，TNT：$C_7H_5O_6N_3 \rightarrow 2.5H_2O+3.5CO+3.5C+1.5N_2$。

2. 爆轰产物与有毒气体

爆轰产物是指炸药爆轰时，化学反应区反应终了瞬间的化学反应物。爆轰产物组成成分很复杂，炸药爆炸瞬间生成的产物主要有 $H_2O$、$CO_2$、CO、氮氧化物等气体，如炸药内含硫、氯和金属等时，产物中还会有硫化氢、氯化氢和金属氯化物等。

在爆轰产物生成的气体产物中，有毒气体有 CO、$NO_2$ 及其他氮氧化合物，少数炸药还会有 $H_2S$、$SO_2$ 等，危害人体健康，致人死亡，有些有毒气体是井下瓦斯爆炸的催化剂，或引起二次火焰(如 CO)。为了确保井下工作人员的健康和安全，《煤矿安全规程》规定：1kg 炸药爆生气体(以 CO 为标准)不得超过 100L/kg。井下爆破时：CO 不得超过 0.0024%，$NO_2$ 不得超过 0.00025%。

影响毒气生成量的主要因素有以下几种。

(1) 炸药的氧平衡。正氧平衡内剩余氧量会生成氮氧化物，负氧平衡会生成 CO，零氧平衡生成的有毒气体量最少。

(2) 化学反应的安全程度。即使是零氧平衡炸药，如果反应不完全，也会增加有毒气体的含量。

(3) 若炸药外壳为涂蜡纸壳，由于纸和蜡均为可燃物，能夺取炸药中的氧，在氧量不

充裕的情况下，将形成较多的 CO。若爆破岩石内含硫时，爆轰产物与岩石中的硫作用，生成 $H_2S$、$SO_2$ 有毒气体。

# 3.5 炸药的爆破性能

## 3.5.1 炸药的爆炸性能参数

1. 爆热

1）爆热的定义

单位质量炸药在定容条件下爆炸所释放出的热量称为爆热，其单位是 kJ/kg 或 kJ/mol。爆热是爆轰气体产物膨胀做功的能源，是炸药的一个重要参数。提高炸药的爆热对于工程爆破具有重要的实际意义。表 3-8 列出了一些炸药的爆热值。



**表 3-8 几种常见炸药的爆热实验值**

| 炸药名称 | 装药密度 /(g·cm$^{-3}$) | 爆热 /(kJ/kg) | 炸药名称 | 装药密度 /(g·cm$^{-3}$) | 爆热 /(kJ/kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| 梯恩梯 | 0.85 | 3389.0 | 特屈儿 | 1.0 | 3849.3 |
| 梯恩梯 | 1.50 | 4225.8 | 特屈儿 | 1.55 | 4560.6 |
| 黑索金 | 0.95 | 5313.7 | 硝酸铵/梯恩梯(80/20) | 0.9 | 4100.3 |
| 黑索金 | 1.50 | 5397.4 | 硝酸铵/梯恩梯(80/20) | 1.30 | 4142.2 |
| 太安 | 0.85 | 5690.2 | 硝酸铵/梯恩梯(40/60) | 1.55 | 4184.0 |
| 太安 | 1.65 | 5690.2 | 硝化甘油 | 1.60 | 6192.3 |

2）爆热的计算

爆热的计算有理论计算和经验计算两种，理论计算主要依据是盖斯定律，计算时需要写出爆炸反应方程式或者说需要知道爆炸时爆炸产物的组成，显然不同的产物组成其计算结果是不同的。经验计算有各种方法，计算时应注意计算式的来历及其适用范围和条件。

（1）爆热的理论计算。爆热的理论计算的基础是爆炸反应方程式的确立和盖斯定律的应用。盖斯定律认为：化学反应的热效应同反应进行的途径无关，当热力过程一定时，热效应只取决于反应的初态和终态。盖斯三角形如图 3-15 所示，1、2、3 分别表示在标准状态下的元素、炸药和爆轰产物。根据盖斯定律，从状态 1 到状态 3，同状态 1 经状态 2 再到状态 3 的热效应相等，即爆热值为

$$Q_{2-3}=Q_{1-3}-Q_{1-2} \quad (3-60)$$

式中，$Q_{2-3}$——炸药的爆热；

$Q_{1-2}$——炸药生成热；

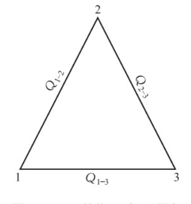



**图 3-15 盖斯三角形图解**

1—元素；2—炸药；3—爆轰产物

$Q_{1-3}$——爆炸产物生成热总和。

炸药的爆轰是在定容绝热压缩条件下进行的，故其爆热通常是指定容爆热，则爆轰产物的定压热和定容热的转换可根据式(3-61)确定

$$Q_v = Q_p + \Delta nRT \tag{3-61}$$

式中，$Q_v$——定容热，kJ/mol；

$Q_p$——定压热，kJ/mol；

$\Delta n$——产物与反应产物中气体摩尔数的差值；

$R$——气体常数(理想的气体常数为 8.314J/mol·K)；

$T$——温度；K。

**【例题 5】** 写出铵油炸药(94.3∶5.7)的爆炸反应方程式(按 1kg 写)，并求出其爆热。

**【解答】** 组分为：$NH_4NO_3 + C_{13}H_{26}$。

首先求 $NH_4NO_3$ 和柴油的摩尔数，分子量：$NH_4NO_3$，80；柴油，182。

1kg 炸药中含 $NH_4NO_3$ 共 943g，换算成摩尔数为 $x=943/80=11.79$；1kg 炸药中含柴油 57g，换算成摩尔数为 $x=57/182=0.31$。

1kg 铵油炸药

$$\text{C 为 } a=0.31\times13=4.03$$

$$\text{H 为 } b=11.79\times4+26\times0.31=55.22$$

$$\text{O 为 } c=11.79\times3=35.37$$

$$\text{N 为 } d=11.79\times2=23.58$$

$11.79NH_4NO_3 + 0.31C_{13}H_{26} \rightarrow 27.61H_2O + 4.03CO_2 + 11.79N_2$ (爆炸反应方程式)

生成热查表 4-9 知：$NH_4NO_3$ 为 365.51kJ/mol；$C_{13}H_{26}$ 为 219.9kJ/mol；$H_2O$ 为 241.75kJ/mol；$CO_2$ 为 395.43kJ/mol。

$$Q_{1-2}=11.79\times365.51+0.31\times219.9=4377.53(\text{kJ})$$

$$Q_{1-3}=27.61\times241.75+4.03\times395.43=8268.3(\text{kJ})$$

$$Q_{2-3}=Q_{1-3}-Q_{1-2}=8268.3-4377.53=3890.77(\text{kJ})$$

则爆热为：$Q_v=Q_{2-3}=3890.77$kJ/kg。

(2) 爆热的经验计算。

① 单体炸药爆热的经验计算法。该法又称阿瓦克尼亚法，此法不需要写出爆炸反应方程式，其步骤如下。

a. 爆炸产物的组成及其总生成热为炸药氧系数的函数。

b. 对应每一氧系数，爆炸产物的总生成热有其最大值 $Q_{1-3\max}$，该极限值由放热量最大原则确定，即首先使炸药中的氢全部氧化成水，多余的氧再使一部分或全部碳氧化成二氧化碳。按该原则，爆炸产物的最大总生成热为

$$A\geqslant100\% \text{ 时，}\quad Q_{1-3\max}=120.35b+395.7a \tag{3-62}$$

$$A<100\% \text{ 时，}\quad Q_{1-3\max}=197.85d+21.425b \tag{3-63}$$

c. 考虑到 $CO_2$、$H_2O$ 的离解和爆炸反应不完全遵循最大放热原则，爆炸产物实际的总生成热小于最大值，但与最大值成正比，即

$$Q_{1-3}=KQ_{1-3\max} \tag{3-64}$$

式中，$K$——爆炸产物生成热的“真实系数”。它与氧系数之间的经验关系为

$$K=0.32A^{0.24} \tag{3-65}$$

d. 确定出爆炸产物实际的总生成热后，便可应用盖斯定律计算爆热

$$A \geq 100\% \text{ 时，} \quad Q_v = 0.32A^{0.24}(120.35b + 395.7a) - Q_{1-2} \tag{3-66}$$

$$A < 100\% \text{ 时，} \quad Q_v = 0.32A^{0.24}(197.85d + 21.425b) - Q_{1-2} \tag{3-67}$$

② 混合炸药爆热的经验计算。其爆热可按式(3-68)计算

$$Q_v = \sum W_i Q_{vi} \tag{3-68}$$

式中，$W_i$——混合炸药中第 $i$ 种炸药的重量百分数；

$Q_{vi}$——混合炸药中第 $i$ 种炸药的爆热。

若已知第 $i$ 组分的定容生成热 $Q_{Vfi}$(kJ · mol$^{-1}$)，则

$$Q_{vf} = \sum n_i Q_{Vf_i} \tag{3-69}$$

式中，$n_i$——第 $i$ 组分的摩尔数。

$Q_{vf}$——炸药的定容生成热；kJ · mol$^{-1}$。

**【例题 6】** 试估算 RDX($C_3H_6O_6N_6$)的爆热。已知 $Q_{1-2} = -93.3$kJ · mol$^{-1}$。

**【解答】** 首先计算 RDX 的氧系数

$$A = \frac{6}{3\times 2 + \frac{1}{2}\times 6} = \frac{6}{9} = 66.7\% < 100\%$$

由(3-67)式知：1mol 炸药的爆热为 $Q_v = 0.32(66.7)^{0.24}(197.85\times 6 + 21.42\times 6) + 93.3 = 1246.9$(kJ · mol$^{-1}$)或 1kg 炸药的爆热为 $Q_v = \frac{1246.9}{222}\times 1000 = 5616.7$(kJ/kg)。

表 3-9 就列举了一些常用炸药和爆炸产物的生成热(单质炸药的生成热为零，不考虑相变)，某些物质的生成热还可以通过燃烧热或有关计算(如键能加和法)求得。



**表 3-9 某些物质和炸药的生成热(定压，291K 时)**

| 物质 | 分子式 | 相对分子质量 M | 生成热 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | kJ · mol$^{-1}$ | kJ · kg$^{-1}$ |
| 梯恩梯 | $C_7H_5O_6N_3$ | 227 | 73.22 | 322.56 |
| 2，4-二硝基甲苯 | $C_7H_6O_4N_2$ | 182 | 78.24 | 429.89 |
| 特屈儿 | $C_7H_5O_8N_5$ | 287 | −19.66 | −68.52 |
| 太安 | $C_5H_8O_{12}N_4$ | 316 | 541.28 | 1712.92 |
| 黑索今 | $C_3H_6O_6N_6$ | 222 | −65.44 | −294.76 |
| 奥克托今 | $C_4H_8O_8N_8$ | 296 | −74.89 | −253.02 |
| 硝酸肼 | $N_2H_5NO_3$ | 95 | 250.20 | 2633.83 |
| 硝基胍 | $CH_4O_2N_4$ | 104 | 94.46 | 879.4 |
| 硝基甲烷 | $CH_3NO_2$ | 61 | 91.42 | 1498.70 |
| 硝化棉(含 N12.2%) | $C_{22.5}H_{28.8}O_{35.1}N_{8.7}$ | 998.2 | 2689.00 | 2702.86 |
| 硝化乙二醇 | $C_2H_4O_6N_2$ | 152 | 247.90 | 1630.93 |
| 硝基脲 | $CH_3O_3N_3$ | 105 | 283.05 | 2695.69 |
| 硝化甘油 | $C_3H_5O_9N_3$ | 227 | 370.83 | 1633.60 |




| 物质 | 分子式 | 相对分子质量 $M$ | 生成热 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $kJ \cdot mol^{-1}$ | $kJ \cdot kg^{-1}$ |
| 硝酸脲 | $CH_5N_3O_4$ | 123 | 564.17 | 4586.75 |
| 1，5-二硝基萘 | $C_{10}H_6O_4N_2$ | 218 | −14.64 | −67.17 |
| 1，8-二硝基萘 | $C_{10}H_6O_4N_2$ | 218 | −27.61 | −126.67 |
| 硝酸铵 | $NH_4NO_3$ | 80 | 365.51 | 4568.93 |
| 硝酸钠 | $NaNO_3$ | 85 | 467.44 | 5499.25 |
| 硝酸钾 | $KNO_3$ | 101 | 494.09 | 4891.97 |
| 高氯酸铵 | $NH_4ClO_4$ | 117.5 | 293.72 | 2499.72 |
| 高氯酸钾 | $KClO_4$ | 138.5 | 437.23 | 3156.88 |
| 水(气) | $H_2O$ | 18 | 241.75 | 13430.64 |
| 水(液) | $H_2O$ | 18 | 286.06 | 15892.23 |
| 一氧化碳 | $CO$ | 28 | 112.47 | 4016.64 |
| 二氧化碳 | $CO_2$ | 44 | 395.43 | 8987.04 |
| 一氧化氮 | $NO$ | 30 | −90.37 | −3012.48 |
| 二氧化氮(气) | $NO_2$ | 46 | −51.04 | −1109.67 |
| 二氧化氮(液) | $NO_2$ | 46 | −12.97 | −281.97 |
| 氨 | $NH_3$ | 17 | 46.02 | 2707.29 |
| 甲烷 | $CH_4$ | 16 | 76.57 | 4785.45 |
| 石蜡① | $C_{18}H_{38}$ | 254 | 558.56 | 2199.07 |
| 木粉① | $C_{39}H_{70}O_{28}$ | 986 | 5690.24 | 5771.03 |
| 柴油 | $C_{13}H_{26}$ | 182 | 219.9 | 1208.24 |
| 轻柴油① | $C_{16}H_{32}$ | 224 | 661.07 | 2951.21 |
| 沥青① | $C_{30}H_{18}O$ | 394 | 594.13 | 1507.94 |



注：①为定容条件下的生成热。

3）爆热的测定

爆热的测定通常用量热弹测量，其装置如图 3-16 所示。测定的基本操作是：一般取 100g 炸药卷并插入两只电雷管，将其悬吊于弹盖上，接出雷管脚线，安好弹盖后，随即将弹内空气抽出，并用氮气置换剩余的气体，再抽成真空，然后把弹体放入量热桶中，桶内注入一定数量蒸馏水，使其全部淹没弹体。恒温一小时后，记录水温 $T_0$，接着引爆炸药，水温随即上升，记下最高温度 $T$。

被测炸药的爆热 $Q_v$ 可按式(3-70)求出

$$Q_v=\frac{(C_{水}+C_{仪})\cdot(T-T_0)-q}{m} \tag{3-70}$$

式中，$Q_v$——被测炸药的爆热，kJ/kg；

$C_水$——采用蒸馏水的总热容，kJ/℃；

$C_仪$——试验装置的热容，以当量的水的热容表示，kJ/℃；

$q$——雷管爆热，kJ；

$m$——被测的炸药量，kg。

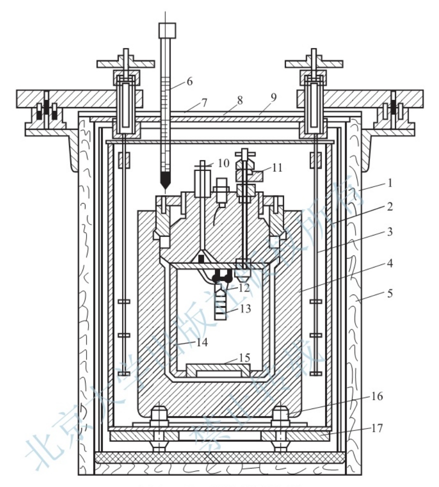



**图 3-16 爆热测定装置**

1—水桶；2—量热桶；3—搅拌桨；4—量热弹体；5—保温桶；6—贝克曼温度计；7、8、9—盖；10—电极接线柱；11—抽气口；12—电雷管；13—药柱；14—内衬桶；15—垫块；16—支撑螺栓；17—底托

应该指出，由于各种条件的影响，用上述方法测出的爆热只是一个近似值。

4）影响爆热的因素

提高炸药的爆热对于提高炸药的作功能力具有重要的意义。通常用来提高炸药爆热的途径主要有以下几个。

（1）炸药的氧平衡。零氧平衡时，炸药内可燃元素或可燃剂完全氧化放出最大热量。但零氧平衡的炸药所放出的能量也不相同，炸药中含氧量越多，单位质量放出的热量也越大。此外，由盖斯定律知，炸药的生成热越小，爆热就越高。

（2）装药密度。对缺氧较多的负氧平衡炸药，增加炸药密度可以增加爆热，这是因为炸药密度增加，爆压增大，使二次可逆反应向增加爆热的方向发展。增加炸药密度对其他炸药影响不大。

（3）附加物影响。在炸药中加入的细金属粉末不仅能与氧生成金属氧化物，而且能与氮反

应生成氮化物，这些反应都是剧烈的放热反应，从而增加爆热。例如，在黑索金中加入适量的镁粉，爆热可提高 50%。在混合炸药中加入铝粉、镁粉等是获得高爆热炸药常用的方法。

(4) 装药外壳影响。增加外壳强度或重量，能阻止气体产物的膨胀、提高爆压，从而提高爆热。特别对缺氧严重的炸药影响较大。

(5) 炸药化学反应的完全程度。炸药反应越完全，放热越充分，则爆热越高。

2. 爆温

爆温是炸药的重要参数之一，一般来说，所提到的“爆温”概念为以下 3 种情形之一。

(1) 炸药爆炸所释放的热量将爆炸产物所能加热到的最高温度(实际为绝热火焰温度)。

(2) 爆轰的 C-J 温度(由流体力学理论与状态方程得出的温度)。

(3) 反应的平均温度(如北京理工大学许更光院士用光谱法测量得出的温度)。

在工程爆破中，要提高炸药的作功能力，则要求爆温高一些；相反在煤矿井下有瓦斯与煤尘爆炸危险的工作面爆破，则要限制爆温，一般限制在 2000℃以内。

爆温的计算方法常采用卡斯特法，即利用爆热和爆炸产物的平均热容来计算爆温。为使计算简化，首先建立如下 3 个假设。

(1) 爆炸过程近似视为定容过程。

(2) 爆炸过程是绝热的，爆炸反应放出的能量全部用来加热爆炸产物。

(3)爆炸产物的热容只是温度的函数，与爆炸时所处的的压力等其他条件无关。

根据上述假定，炸药的爆热与爆温的关系可以写为

$$Q_v = \bar{c}_v t = t \sum c_{jv} n_j \tag{3-71}$$

式中，$Q_v$——爆热，kJ/mol 或 kJ/kg；

$t$——所求的爆温，℃；

$\bar{c}_v$——0～$t$℃范围内全部爆炸产物的平均热容，kJ/(mol・℃)或 kJ/(kg・℃)；

$c_{jv}$、$n_j$——爆炸产物中 $j$ 类型产物的定容热容和摩尔数。

产物热容与温度的关系为

$$c_{jv} = a_j + b_j t \tag{3-72}$$

各种产物的 $a_j$、$b_j$ 值见表 3-10。

令 $\sum n_j a_j = A$，$\sum n_j b_j = B$，并将式(3-72)代入式(3-71)可得

$$t = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4000BQ_v}}{2B} \tag{3-73}$$

**表 3-10　爆炸产物的 $a_j$、$b_j$ 值**

| 爆炸产物 | $a_j$ | $b_j \times 10^{-3}$ | 爆炸产物 | $a_j$ | $b_j \times 10^{-3}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 双原子气体 | 20.1 | 1.88 | 水蒸气 | 16.7 | 9.0 |
| 三原子气体 | 41.0 | 2.43 | $Al_2O_3$ | 99.9 | 28.18 |
| 四原子气体 | 41.8 | 1.88 | NaCl | 118.5 | 0.0 |
| 五原子气体 | 50.2 | 1.88 | C | 25.1 | 0.0 |

**【例题 7】** 计算 TNT 的爆温。已知其爆炸反应方程式如下

$$C_6H_2(NO_2)_3CH_3 \rightarrow 2CO_2 + CO + 4C + H_2O + 1.2H_2 + 1.4N_2 + 0.2NH_3 + 1093.6\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

**【解答】** 先计算爆炸产物的热容。

对于二原子气体：$\overline{C}_V = (1+1.2+1.4)(20.08+18.83\times10^{-4}t) = 72.29+67.79\times10^{-4}t$

对于 $H_2O$：$\overline{C}_V = 16.74+89.96\times10^{-4}t$

对于 $CO_2$：$\overline{C}_V = 2(37.66+24.27\times10^{-4}t) = 75.32+48.54\times10^{-4}t$

对于 $NH_3$：$\overline{C}_V = 0.2(41.84+18.83\times10^{-4}t) = 8.37+3.77\times10^{-4}t$

对于 C：$\overline{C}_V = 4\times25.11 = 100.44$

$\therefore\ \sum\overline{C}_{Vi} = 273.16+210.06\times10^{-4}t$

因而，$A=273.16$，$B=0.021$。将此值代入式(3-73)，得

$$t = \frac{-273.16+\sqrt{(273.16)^2+4\times0.021\times1093.6\times1000}}{2\times0.021} = 3210.9(℃)$$

或 $T=3210.9+273=3483.9(\text{K})$。

在实际应用中，为提高爆温，一般加入高热值的金属粉末，如铝、镁等，它们的爆炸产物生成热很大，而产物的热容却增加不多。为达到降低爆温的目的，一般向炸药中加入附加物，以改变炸药中氧与可燃元素的比例，使之产生不完全氧化的产物，从而减少产物的生成热，有的附加物不参与爆炸反应，只是增加产物的总热容量。例如，可在矿用安全炸药中加入氯化物等物质。

3. 爆容

所谓炸药的爆容(或称比容)，是指 1kg 炸药爆炸生成的气体产物在标准状态下的体积。标准状态是指一个大气压和零摄氏度，其单位为 L/kg。爆轰气体产物是炸药放出热能借以做功的介质。爆容越大，炸药的作功能力越强。因此，爆容是炸药爆炸作功能力的一个重要参数。

若已知爆炸反应方程式，就可以应用阿伏加德罗定律计算炸药的爆容。若炸药通式是按 1mol 写出的，则爆容的计算公式为

$$V_0 = \frac{\sum n_i\times1000}{\sum m_iM_i}\times22.4 \tag{3-74}$$

式中，$n_i$——爆炸产物气体产物的总摩尔数；

$m_i$——炸药某组分的摩尔数；

$M_i$——炸药某组分的分子量。

若炸药通式是按 1kg 写出的，则

$$V_0 = 22.4\sum n_i \tag{3-75}$$

**【例题 8】** 计算 TNT 的爆容。已知其爆炸反应方程式为

$$C_7H_5O_6N_3 \rightarrow 2.5H_2O + 3.5CO + 1.5N_2 + 3.5C$$

**【解答】** $n=2.5+3.5+1.5=7.5$，$M=0.227$，代入式(3-74)，有

$$V_0 = \frac{22.4\times7.5}{0.227} = 740(\text{L}\cdot\text{kg}^{-1})$$

4. 爆压

炸药在密闭容器中爆炸时，其爆炸产物对器壁所施的压力称为爆压，单位为MPa。爆炸过程中爆炸产物内的压力是不断变化的，爆压是指爆轰结束时，爆炸产物在炸药初始体积内达到热平衡时的流体静压值。爆压反映炸药爆炸瞬间的猛烈破坏程度。

计算爆压的关键在于选择产物的状态方程，一般可利用阿贝尔状态方程来计算，即

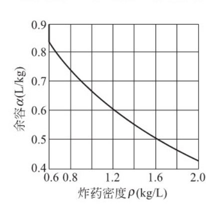



图 3-17　炸药密度和余容

$$p=\frac{nRT}{V-\alpha}=\frac{n\rho}{1-\alpha\rho}RT \tag{3-76}$$

式中，$p$——爆压，kg/cm$^2$；

$V_0$——爆容，L/kg；

$T$——爆温，K；

$\rho$——炸药密度，g/cm$^3$；

$\alpha$——气体分子的余容，L/kg。计算时，$V_0$、$T$ 可由计算得到，$\alpha$ 由图 3-17 查得。

乘积 $nR$ 可用炸药爆容 $V_0$ 来表示。因爆容是标准状态下的体积，由理想气体状态方程可知

$$nR=\frac{P_0V_0}{V-\alpha}=\frac{V_0}{273} \tag{3-77}$$

## 3.5.2　炸药的爆破性能概述

1. 炸药爆炸的动、静作用

炸药发生爆炸时所形成的高温高压气体产物，必然对周围的介质产生强烈的冲击和压缩作用。若物体与爆炸的炸药接触或相距较近，由于受到爆轰产物的直接作用，物体便产生运动、变形、破坏和飞散；若物体离爆炸源较远，则受爆轰产物的直接破坏作用就不明显。习惯上将炸药爆炸时对周围物体的各种机械作用称为炸药的爆炸作用。炸药的爆破作用可分为两部分：利用炸药爆炸产生冲击波或应力波形成的破坏作用称为炸药爆炸的动作用；利用爆炸气体产物的流体静压或膨胀功形成的破坏或抛掷作用称为炸药爆炸的静作用。

一般来讲，炸药都具有动和静两种作用。但不同类型的炸药，两种作用的表现程度不同。如火炸药几乎不存在动作用，铵油炸药的动作用也较弱；而猛炸药的动作用则表现很明显。此外，同一种炸药，随装药结构、爆炸条件的不同，其动和静两种爆炸作用的表现程度也不同。根据爆破工程要求合理选择炸药或装药结构，首先要了解炸药动作用和静作用特性，以及动、静作用的破坏机理及其表现形式。

炸药的动作用和静作用决定于炸药爆炸作用在炮孔壁上的压力变化。孔壁初始冲击压力越大，作用时间越短，则动作用越强；反之则静作用越强。炮孔壁上的压力决定于炸药和介质的性质、装药结构和爆破条件等。

对于耦合装药，炸药爆炸时的爆轰波直接与周围介质发生碰撞，并在介质中形成爆炸冲击波和应力波。对于大多数岩石来说，冲击波作用范围很小，若忽略不计，可近似认为爆轰波与岩石的碰撞是弹性的，在岩石中直接产生应力波，则按弹性波理论，爆轰波以爆

轰压力 $P_1=\frac{\rho_0 D^2}{4}$ 的值入射到岩石等介质中，则在介质中产生的透射压力即为孔壁上的初始压力值。按弹性碰撞和正入射条件，可得孔壁初始压力 $P_2$ 的计算公式

$$P_2=\frac{1}{4}\rho_0 D^2\frac{2}{1+\frac{\rho_0 D}{\rho_m c_p}} \tag{3-78}$$

式中，$\rho_0$、$D$——炸药的密度和爆速；

$\rho_m$、$c_p$——介质的密度和弹性波速。

对于不耦合装药，炸药爆炸时的爆轰波首先压缩间隙内的空气，产生空气冲击波，然后再由空气冲击波冲击炮孔壁并在介质内产生爆炸应力波。若炮孔内的爆轰产物按 $PV_r=A(r=3)$ 的规律膨胀，膨胀时的初始压力按平均爆轰压 $P_1/2$ 计算。则可导出在不耦合装药条件下，作用在孔壁上的初始压力为

$$P_2=\frac{1}{8}\rho_0 D^2\left(\frac{d_c}{d_b}\right)^6 n \tag{3-79}$$

式中，$d_c$、$d_b$——药柱和炮孔直径；

$n$——爆轰产物碰撞炮孔壁时的压力增大系数，$n=8\sim11$，一般取 $n=10$。

为了研究和了解炸药的爆破性能和对周围介质的破坏能力，合理的利用炸药的能量，一般从两方面对炸药进行评价：一是炸药的做功能力或称爆力，二是炸药的冲击能力或称猛度。用猛度和爆力表征炸药的爆破性能。



2. 炸药的爆力

炸药爆炸对周围介质所作机械功的总和称为炸药的爆力，又称炸药的做功能力。它反映了爆生气体产物膨胀做功的能力，也是衡量炸药爆炸作用的重要指标。

与爆轰条件过程一样，炸药爆炸做功的过程也是极其迅速的，因此可以假设炸药爆轰生成的高温高压气体进行绝热膨胀做功。根据热力学第一定律：系统内能的减少等于系统放出的热能和系统对外所做的功。其数学表达式为

$$-\mathrm{d}U=\mathrm{d}Q+\mathrm{d}A \tag{3-80}$$

式中，$-\mathrm{d}U$——系统内能的减少量；

$\mathrm{d}Q$——系统放出的热量；

$\mathrm{d}A$——系统所做的功。

根据上述假设，爆轰产物的膨胀过程是绝热的，故 $-\mathrm{d}U=0$，则式(3-80)可写为

$$-\mathrm{d}U=\mathrm{d}A=-\bar{c}_v\mathrm{d}T \tag{3-81}$$

假设气体为理想气体，并引入爆热表达式 $Q_v=C_vT_1$，有

$$A=\int-\mathrm{d}U=\int_{T_1}^{T_2}-\bar{c}_v\mathrm{d}T=\bar{c}_v(T_2-T_1)=Q_v\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right)=\eta Q_v \tag{3-82}$$

式中，$T_1$——爆轰产物的初始温度；

$T_2$——爆轰产物做功后的温度；

$\bar{c}_v$——爆轰产物的平均热容；$\eta=\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right)$称为热效率或做功效率。

应用气体等熵绝热状态方程 $PV^K=$常数，有

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{K-1}=\left(\frac{P_2}{P_1}\right)\frac{K-1}{K} \tag{3-83}$$

代入式(3-82)，可改写为

$$A=Q_v\left[1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{K-1}\right]=Q_v\left[1-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right] \tag{3-84}$$

式中，$V_1$、$P_1$——爆炸产物的初始比容和压力；

$V_2$、$P_2$——爆炸产物膨胀后的比容和压力；

$K$——爆炸产物的等熵指数。

综合以上分析可见，爆热是决定炸药做功能力的最基本因素，因此提高爆热是提高炸药做功能力最有效的措施，另外做功能力还与产物的膨胀能力及等熵指数有关。很显然，炸药的爆热越大，爆炸产物膨胀比越大，则做功能力越大；当爆热和产物的膨胀程度相同时，则等熵指数越大，做功能力也越大。

试验测定爆力的方法常用的有：铅铸法、弹道臼炮法和抛掷漏斗法。

1）铅铸法

此法由澳大利亚特劳茨(Trauta)提出，后来确定为测定炸药做功能力的国际标准方法，因此又称特劳茨实验法。铅铸法是目前最简单、最常用的做功能力实验方法。其原理是以一定量的炸药在铅铸中央内孔中爆炸，爆炸产物膨胀将内孔扩张，按铸孔爆炸前后体积的增量作为判断和比较炸药做功能力的尺度。铅铸为圆柱体，用高纯度铅浇铸而成，直径 200mm、高 200mm，中央有一直径 25mm、深 125mm 的圆柱内孔。铅铸法实验如图 3-18 所示。实验时将装备好的炸药试样准确称取(10±0.01)g，放在用锡箔卷成的圆柱筒(直径 24mm)内，装上 8 号雷管后放入铅铸的内孔中，孔中剩下的空隙用一定颗粒度的干燥石英砂填满，以防止炸药产物向外飞散。炸药引爆后，圆孔扩大为犁形，清除孔内残渣注入水测量扩孔后的容积。扩孔前后的容积差减去雷管扩孔容积(8 号雷管的扩孔值为 28.5mL)作为炸药的爆力值，单位为毫升。

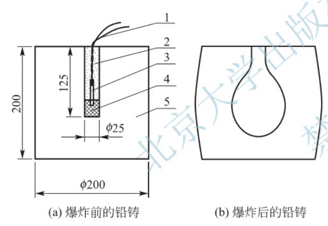



**图 3-18　炸药爆力测定法的铅铸**

1—雷管线；2—石英砂；
3—铜壳电雷管；4—药包；5—铅铸

因环境温度对扩孔值有影响，故标准试验温度规定为 15℃，不同温度时扩孔值的校正值见表 3-11。

**表 3-11　扩孔值受温度影响的修正值**

| 温度/℃ | −20 | −15 | −10 | −5 | 0 | +5 | +8 | +10 | +15 | +20 | +25 | +30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 修正值/% | +14 | +12 | +10 | +7 | +5 | +3.5 | +2.5 | +2 | 0 | −2 | −4 | −6 |

2）弹道臼炮法

如图 3-19 所示，一个重为 $W_1$ 的钢质臼炮，用摆杆悬挂在钢支架上，将药量 10g、$\Phi$20mm 带雷管孔的受试药柱放在爆炸室内，然后用一圆柱形实心炮弹(重为 $W_2$)按松配合

将臼炮孔堵住。炸药爆炸后，炮弹被推出，同时臼炮向反方向摆动一角度 $\alpha$，可由角度盘读出度数。

显然，炸药所做的功 $A$ 应等于臼炮升高的位能 $A_1$ 与炮弹的动能 $A_2$ 之和，即

$$A=A_1+A_2 \tag{3-85}$$

经用公式推导后得

$$A=W_1L\left(1+\frac{W_1}{W_2}\right)(1-\cos\alpha) \tag{3-86}$$

式中，$W_1$——臼炮重；

$W_2$——炮弹重；

$L$——摆长。

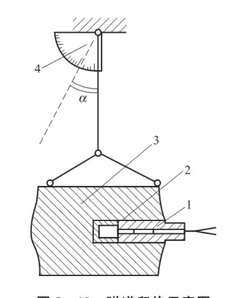



**图 3-19 弹道臼炮示意图**

1—炮弹；2—炸药；3—臼炮；4—角度盘

对固定设备，三者均为已知数，所以早要测量摆角 $\alpha$，就可以算出单位重量的炸药所做的功。平时习惯于用梯恩梯当量表示某炸药威力的大小。若以 $\alpha_0$ 代表梯恩梯的摆角，以 $\alpha$ 代表被测炸药的摆角，则

$$\text{梯恩梯当量}=\frac{1-\cos\alpha}{1-\cos\alpha_0}\times100\% \tag{3-87}$$

弹道臼炮法测试精度较铅铸法高，并能以绝对功或梯恩梯当量定量地比较炸药的威力大小，含铝炸药由于二次反应不完全，所测值常偏低。

3）抛掷漏斗法

炸药在岩土内爆炸时，若炸药距自由面的距离(即最小抵抗线)不超过某个限度，就会在地面形成锥体抛掷漏斗。如图 3-20 所示。漏斗坑是以其半径 $r$ 对深度 $w$(此值称为最小阻力线)之比值表示其特征的，即

$$n=\frac{r}{w} \tag{3-88}$$

**图 3-20 抛掷漏斗**

$r$—漏斗半径；$w$—最小抵抗线；$c$—炸药

式中，$n$——抛掷爆破作用指数。

若 $n=1$，称为标准抛掷漏斗；$n>1$ 时，称为强抛掷漏斗；$n<1$ 时，称为弱抛掷漏斗或松动爆破。漏斗坑的特征和容积大小与炸药装药的性质、质量，土壤介质的性质以及炸药在介质中的相对位置等均有关。

因此，采用此法测定炸药的做功能力时，要考虑上述各因素，尽可能采用一致的实验条件下获得的爆破容积来判断。

对于标准抛掷漏斗坑，其体积为

$$V=\frac{1}{3}\pi w^3\approx w^3 \tag{3-89}$$

标准抛掷漏斗坑体积与炸药质量 $m$ 的关系为

$$m=KV=Kw^3 \tag{3-90}$$

式中，$m$——炸药的质量；

$K$——形成单位体积漏斗坑所需要的炸药量。

对于强或弱抛掷漏斗坑，其体积为

$$V=\frac{1}{3}\pi r^2 w\approx r^2 w \tag{3-91}$$

抛掷爆破所需炸药质量可按式(3-92)计算(对于强抛掷爆破则更为适用)

$$m=Kw^3(0.4+0.6n^3) \tag{3-92}$$

用此方法判断炸药的做功能力时，爆炸的条件是相似的。炸药的 $K$ 值不同，则炸药的做功能力也不同。在此情况下，一种炸药得到 $K_1$ 值，而另一种炸药则得到 $K_2$ 值，它们的做功能力与 $K$ 值成反比，即 $A_1/A_2=K_2/K_1$。这种比较应尽可能在 $n$ 值相近的情况下进行，实验应在地质结构基本相同的场地实施，所以炸药的质量、密度、形状和放置的深度应尽可能相同。一般测定被测炸药与参比药作功能力的比值。

此法的优点是实验条件与炸药工程爆破的实际情况相接近，实验药量可以较大，方法简单，不需要专门的仪器设备，便于普及；缺点是实验结果受介质条件影响较大，重复性不好，只能对炸药做功能力进行近似测定或相对比较。

3. 炸药的猛度

炸药爆炸产生冲击波和应力波的作用强度称为猛度。它表征了炸药动作用的强度，是衡量炸药爆炸特性及爆炸作用的重要指标。

炸药做功能力是决定炸药总体破坏的能力，而猛度只是决定炸药局部破坏的能力。弹丸爆炸形成破片，破甲弹的破甲作用，爆炸高速抛掷物体，爆炸切割钢板的和破坏桥梁，以及对矿体、岩体、土壤、混凝土等的猛炸作用，均是炸药局部破坏的例子。炸药的猛度对于武器设计、爆破工程具有实际意义，在爆破工程中，岩体或矿体的坚硬程度以及性质不同，为了获得一定块度的矿岩，就应根据矿岩的性质来选用不同猛度的炸药，否则就有可能造成不利于资源利用的过分粉碎，或形成不便于装载运输，甚至需要二次爆破的大块。

炸药的猛度通常用铅柱压缩法、猛度摆法和平板炸坑实验进行测定。

1) 铅柱压缩法

此法为 Hess 于 1876 年提出的，因此又称为 Hess 试验法。铅柱压缩法试验装置如图 3-21 所示。



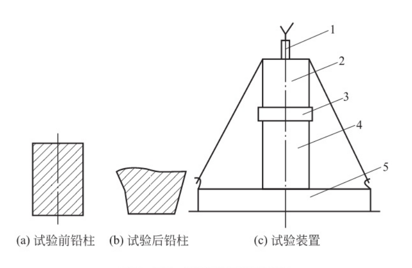



**图 3-21　铅柱压缩法装置**

1—雷管；2—炸药；3—钢片；4—铅柱；5—厚钢板

在一厚钢板上放置一个由纯铅制成的圆铅柱，该圆柱直径(40±0.2)mm、高(60±0.5)mm。

在铅柱上放置一块直径 41mm、厚(10±0.2)mm 的钢片，它的作用是将炸药的爆轰能量均匀地传递给铅柱，使铅柱不易碎而发生塑性变形。

在钢片上放置炸药装药试样，装药密度一般控制在 $1.0g/cm^{-3}$，质量为 50g。试样装在直径 40mm 的纸筒中，用细线将装药试样及铅柱固定在钢板上，试样纸筒、钢片和铅柱要处于同一轴线上。

试验前，铅柱的高度要经过精确测量。炸药爆炸后，铅柱被压缩成蘑菇形，高度减小，用卡尺或螺旋测微计测量压缩后铅柱的高度(从 4 个对称位置依次测量，取平均值)。用试验前后铅柱的高度差 $\Delta h$ 表示炸药的猛度，也称为铅柱压缩值。

2）猛度摆法

试验装置原理如图 3－22 所示。摆体重 $W$，摆长 $L$，受试炸药贴放在摆体的水平方向上。当炸药爆炸后，摆体受到爆轰产物的冲击而摆动，记录下摆角 $\alpha$，则摆体受到的比冲量为

$$I=\frac{WT}{\pi S}\sin\frac{\alpha}{2} \tag{3-93}$$

式中，$S$——摆体接受冲量的面积；

$T$——摆的周期，$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$；

$g$——重力加速度。

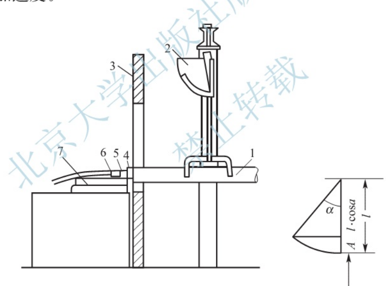



**图 3－22　猛度弹道摆**

1—摆体；2—量角器；3—防护板；4—钢片；5—药柱；6—雷管；7—托板

按式(3－93)计算出的比冲量，可用它作为炸药猛度的指标。爆破不同性质的岩石，应选择不同猛度的炸药。一般来说，岩石波阻抗越大，选用炸药的猛度越大；爆破波阻抗较小的岩土时，炸药的猛度不宜过高。在工程爆破中，采用空气柱间隔装药或耦合装药等措施，可减小作用在炮孔壁上的初始压力，从而降低猛度。

3）平板炸坑实验

平板炸坑实验又称平板凹痕实验，简称板坑实验，用于测定炸药相对猛度。实验时，将受试药柱置于板的中心，用雷管和传爆药柱引爆，以板上形成的炸坑深度评价炸药猛度。通常选择某一梯恩梯药柱的炸坑深度为 100%，算出试样坑深的相对值，作为相对猛度。板坑实验也是间接测爆压的一种简便手段，此法是先标定好常用炸药的爆压与坑深值

的关系，再根据试样的坑深值由关系曲线估算试样爆压。

4. 炸药的爆速

爆轰波在炸药药柱中的传播速度称为爆轰速度，简称为爆速，通常以 m/s 或 km/s 为单位。单体炸药、猛炸药混合物炸药和某些混合炸药的爆速有较大的差异。单质炸药、猛炸药混合物炸药的极限直径较小，在一般使用条件下，其爆轰大多处于理想爆轰的状态，爆速的数值除装药密度之外，主要决定于炸药本身的结构和性质。对于混合炸药，特别是由较大比例的惰性添加剂组成的混合炸药，以及绝大部分工业炸药，它们的极限直径和临界直径都较大。在一般使用条件下，炸药装药或药包的直径大多处于极限直径以下、临界直径以上的范围。炸药的爆轰处于非理想爆轰状态，所以其爆速的影响因素比单质炸药要复杂得多。目前，爆速的实验测定方法有导爆索法、测时仪法和高速摄影法。

1）导爆索法

导爆索法又称道特里什(Dautriche)法。其原理是利用已知爆速的导爆索测定炸药的爆速。该方法的试验装置如图 3 - 23 所示。

当炸药由雷管引爆后，爆轰波传至 $A$ 点时，引爆导爆索的一端，同时继续沿炸药药卷传播，当到达 $B$ 点时，导爆索的另一端也被引爆。在某一时刻，导爆索中沿两个方向传播的爆轰波相遇于 $N$，在铝板或铅板记录爆轰波相遇时碰撞的痕迹。根据爆轰波相遇时所用的时间相等的原理可算得炸药的爆速 $D$。

$$t_1=t_2 \Rightarrow l/D+t_{BN}=t_{AN}$$
$$\Rightarrow l/D+(BM-\Delta h)/D_c=(AM+\Delta h)/D_c, \quad BM=AM$$
$$\Rightarrow D=l\times D_c/2\Delta h$$

2）电测法

该方法是利用频率计或爆速测定仪直接记录爆轰波在药柱两点间的传播时间间隔，根据记录的时间和两点间的距离可求算出两点间的炸药平均爆速。测试仪记时测量法的基本工作原理如图 3 - 24 所示。



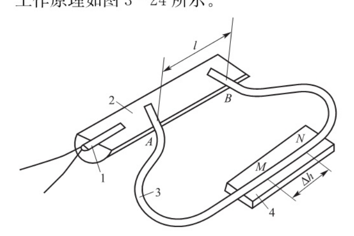



**图 3 - 23　导爆索法测爆速的装置图**

1—雷管；2—试样；
3—导爆索；4—铝板或铅板

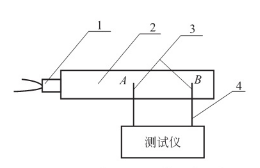



**图 3 - 24　电测法测试系统图框**

1—雷管；2—试样；
3—传感元件；4—信号传输线

实验采用的是“断—通”方式：在爆轰波未传到探针位置前，探针处于“断”的状态；在爆轰波传到探针位置 $A$ 点的瞬间，爆轰产物被电离而使探针处于“通”的状态，爆速仪触发一个电信号，爆轰波到达 $B$ 点再触发一个电信号，这样电子测时仪就记录了爆轰

波通过 $A$、$B$ 两点的时间 $t$，于是可求出 $AB$ 段的平均爆速。

3）高速摄影法

高速摄影法是利用爆轰波阵面传播时的发光现象，用转镜式高速摄影机将爆轰波阵面沿药柱移动的光迹拍摄记录在胶片上，得到爆轰波传播的时间—距离扫描曲线，然后测量曲线上各点的瞬时传播速度。图 3-25 是转镜式高速摄影机测爆速的原理图。

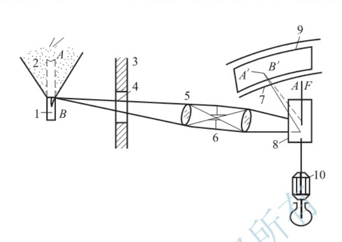



**图 3-25　高速摄影法测爆速原理图**

1—药柱；2—爆轰产物；3—防护墙；4—透光玻璃窗口；5—物镜；
6—狭缝；7—相机框；8—转镜；9—胶片；10—高速电动机



## 本章小结

本章集中介绍了与炸药爆炸相关的一些基本概念，基本理论和基本实验，这些内容是后续章节的基础。现将其中的要点归纳如下。

（1）炸药发生化学变化的 3 种基本形式、炸药爆炸的三要素、炸药的分类。

（2）炸药的起爆和起爆能、炸药的起爆机理，炸药的热感度、机械感度、起爆冲能感度、冲击波感度、静电火花感度、激光感度、枪击感度等。

（3）波、横波、纵波、音波、压缩波、稀疏波、冲击波的概念，冲击波的基本特征，炸药的爆轰理论。

（4）炸药氧平衡的概念及其计算方法，爆炸反应方程式。

（5）爆热、爆温、爆容、爆压的概念，爆力、猛度、爆速的概念。

## 习　　题

**一、名词解释**

爆炸，炸药，感度，氧平衡，殉爆，爆热，爆温，爆容，爆压，爆力，猛度

**二、填空题**

1. 炸药爆炸的三要素为______、______、______。

2. 炸药化学变化的基本形式可以分为______、______、______。

3．炸药感度区分为____、____、____、____、____、____、____。

4．波可分为两大类，即____、____。按波内质点运动方向和波传播方向之间的关系，波可以分为____、____。

5．炸药理想爆速主要取决于____、____、____。

6．根据氧平衡值的大小，可将氧平衡分为____、____、____ 3 种类型。

7．炸药的爆炸性能参数主要有____、____、____、____。

**三、简答题与计算题**

1．炸药化学变化的基本形式是什么？各有何特点？

2．在铵油炸药中(硝酸铵与柴油的混合炸药)，加入 4%木粉作疏松剂，试按零氧平衡设计炸药配方。

3．已知凝聚炸药的纯热指数 $K$ 值一般取为 3，试推导计算凝聚炸药爆轰波参数的方程式。

4．如果采用理想气体状态方程来计算爆炸压力 $P$，则存在关系 $P=\rho_0(K-1)Qv$。试证明：爆轰压力近似等于爆炸压力的 2 倍。

5．解释爆炸的爆轰理论。

6．何谓炸药的爆力和猛度？有何区别？如何测定？

# 第4章 岩石爆破分级与凿岩机具

爆破技术的改进和爆破效率的提高往往依赖于施工机具。在用人工打眼或绳索式冲击钻机钻孔的年代，推广深孔延时爆破就有很多困难，更不用说采用光面爆破、预裂爆破等需要密集钻孔的爆破新技术了。20世纪50年代以后，高效率潜孔钻机、牙轮钻机和高频冲击风动钻机的出现，钻孔效率成倍提高，使爆破工程中的钻孔作业变得容易多了、大大改善了爆破效果、提高了爆破效率，一些新的爆破技术也应运而生。

## 教学目标

（1）掌握岩石的一般物理与力学性质，熟知岩石的坚固性和可爆性分级。

（2）理解并掌握各种钻眼方法与破岩机理，了解常用凿岩机具的设备类型、凿岩原理及各自的适用条件。



## 教学要求

| 知识要点 | 能力要求 | 相关知识 |
| --- | --- | --- |
| 岩石的物理与力学性质 | 掌握 | 岩石的密度指标、孔隙性、水理性质、抗风化性质以及岩石的强度特性指标 |
| 岩石的坚固性与可爆性分级 | 熟悉 | 岩石的坚固性分级方法：抗压强度法与捣碎法。可爆性分级方法：单因素分级法和双因素分级法 |
| 钻眼方法与破岩机理 | 掌握 | 钻眼方法的分类；冲击、切削、滚压和磨削4种常用的机械破岩方法及其破岩机理 |
| 常用凿岩机及各自的适用条件 | 了解 | 各种凿岩机、岩石电钻和凿岩台车的基本构造及其工作原理 |



引例

### 工具轶事

认识事物，必先识其本质，究其宗旨，观其用途。唯有如此，才能将事物之用途发挥得淋漓尽致。当然，认识事物、改造事物的过程必然要借助恰当的工具，这样才能达到事半功倍的效果。例如，英国科学家有了扫描仪，成功读取了大脑记忆；巴西科学家有了放电鱼群，检测到河水污染；英国科学家有了基因工程，培育出新型微生物。在工程施工过程中，选择合适的施工方法和作业机械，可以大大提高工作效率、缩短工期、节约资金，真正达到事半功倍、四两拨千斤的效果。本章系统全面地介绍岩石的爆破分级与凿岩机具的选择使用，首先从岩石的一般物理与力学性质出发，讲述岩石的坚固性分级和可

爆性分级，继而介绍爆破作业过程中的钻眼方法和破岩机理，最后从机械构造、工作原理、使用方法等方面详细介绍几种常用凿岩机具(图 4-1)。



图 4-1　凿岩机及其配件示例图

# 4.1　岩石物理与力学性质



## 4.1.1　岩石的基本物理性质

各类岩石由于其成因不同、结构构造不同、成分不同，使得其物理力学性质有很大的不同。

1. *岩石的密度指标*

岩石的密度指标主要有岩石的天然密度、干密度、饱和密度、重密度和颗粒密度指标，其含义，计算公式见表 4-1。

表 4-1　岩石的密度指标一览

| 类别 | 含义 | 计算公式 | 测试方法 |
| --- | --- | --- | --- |
| 天然密度 | 岩石在自然条件下，单位体积的质量 | $\rho=m/V$ (g/cm$^3$) | 称重法 |
| 干密度 | 将岩石孔隙中的水全部蒸发掉，试件仅有固体和气体的状态下单位体积的质量 | $\rho_{sa}=\frac{m_s+V_V\rho_w}{V}$ (g/cm$^3$) | 烘干法 |
| 饱和密度 | 孔隙都被水完全充满时单位体积的质量 | $\rho_d=m_s/V$(g/cm$^3$) | 48h 进水法、抽真空法、煮沸法 |
| 岩石容重 | 单位体积岩石的重量 | $\gamma=\rho g$(kN/m$^3$) | 称重法 |
| 颗粒密度 | 岩石中固体物质单位体积的质量 | $\rho_s=m_s/V_s$(g/cm$^3$) | 比重瓶法 |

注：其中 $m$——岩石试件的总质量；$V$——试件的总体积；$m_s$——岩石中固体的质量；$V_V$——孔隙的体积；$\rho_w$——水的密度；$V_s$——岩石中固体的体积。

2. *岩石的孔隙性*

岩石的孔隙性反映了岩石中裂隙的发育程度，描述岩石孔隙性的指标主要有岩石的孔

隙比和岩石的空隙率。

(1) 岩石的孔隙比：岩石的孔隙比是指岩石孔隙的体积与固体体积的比值，其计算公式为

$$e=\frac{V_V}{V_s} \tag{4-1}$$

(2) 岩石的孔隙率：孔隙率 $n$ 是指孔隙的体积与试件总体积的比值，用百分率表示，计算公式为

$$n=\frac{V_V}{V}\times 100(\%) \tag{4-2}$$

还可以通过密度参数分析孔隙率，即

$$n=\frac{V-V_s}{V}=1-\frac{V_s}{V}=1-\frac{m_s/\rho_s}{m_s/\rho_d}=1-\frac{\rho_d}{\rho_s} \tag{4-3}$$

(3) 孔隙率与孔隙比之间的关系：根据孔隙率和孔隙比的含义及其计算公式很容易求得其关系

$$e=\frac{V_V}{V_s}=\frac{V_V}{V-V_V}=\frac{1}{\frac{V}{V_V}-1}=\frac{1}{\frac{1}{n}-1}=\frac{n}{1-n} \tag{4-4}$$

3. 岩石的水理性质

1) 岩石的含水性

岩石的含水率是指岩石孔隙中水的质量与固体质量之比的百分数

$$w=\frac{m_w}{m_s}\times 100\% \tag{4-5}$$

岩石的吸水率是指岩石吸入水的质量与试件固体质量的比值，据试验方法的不同分为自由吸水率和饱和吸水率，计算式为

$$W_a=\frac{m_0-m_s}{m_s}\times 100\%,\quad W_{sa}=\frac{m_p-m_s}{m_s}\times 100\% \tag{4-6}$$

式中，$m_0$——试件浸水 48h 的质量；

$m_p$——试件经煮沸或真空抽气饱和后的质量。

2) 岩石的渗透性

岩石的渗透性是指岩石在一定的水力梯度作用下，水穿透岩石的能力，岩石的渗透性间接反映了岩石中裂隙相互贯通的程度，一般用达西定律来描述

$$q_x=AK\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}x} \tag{4-7}$$

式中，$q_x$——沿 $x$ 方向水的流量；

$h$——水头的高度；

$A$——垂直于 $x$ 方向的截面面积；

$K$——岩石沿 $x$ 方向的渗透系数。

4. 岩石的抗风化指标

岩石的抗风化指标主要有岩石的软化系数、岩石的耐崩解性指数和岩石的膨胀性指标。

1）岩石的软化系数

岩石的软化系数 $\eta$ 是指岩石饱和单轴抗压强度 $R_{cc}$ 与干燥状态下的单轴抗压强度 $R_{cd}$ 的比值，反映了岩石遇水强度降低的程度，其计算式为

$$\eta=\frac{R_{cc}}{R_{cd}} \tag{4-8}$$

软化系数 $\eta\leqslant 1$，该值越小表示岩石受水的影响越大。

2）岩石的耐崩解性指数

岩石的耐崩解性指数 $I_d$ 是通过对岩石试件进行烘干、浸水循环试验所得的指数，反映了岩石在浸水和温度变化的环境下抵抗风化作用的能力。

试验测定方法：将烘干的试块放入一个带有筛孔的圆筒内，使该圆筒在水槽中以20r/min 的速度连续旋转 100min，然后将留在圆筒内的岩块取出再次烘干称重，反复进行两次，可得计算公式为

$$I_{d2}=\frac{m_r}{m_s}\times 100\% \tag{4-9}$$

式中，$I_{d2}$——经两次循环试验所得的耐崩解性指数；

$m_r$——试验前试块的烘干重量；

$m_s$——两次循环试验后，残留在圆筒内试块的烘干重量。

3）岩石的膨胀性

含有粘土矿物的岩石，遇水后会发生膨胀的现象。岩石的膨胀性通常以岩石的自由膨胀率、岩石的侧向约束膨胀率、膨胀压力来描述。

（1）岩石的自由膨胀率是指岩石试件在无任何约束的条件下浸水后所产生的膨胀变形与试件原尺寸的比值，一般可用径向自由膨胀率和轴向自由膨胀率来表示

$$V_H=\frac{\Delta H}{H}\times 100\%,\quad V_D=\frac{\Delta D}{D}\times 100\% \tag{4-10}$$

式中，$\Delta H$、$\Delta D$——分别为浸水后岩石试件的轴向和径向膨胀变形量；

$H$、$D$——分别为岩石试件试验前的高度和直径。

（2）岩石的侧向约束膨胀率是指具有侧向约束的岩石试件浸水后所得的膨胀率，其计算式如下(使岩石仅产生轴向膨胀变形)

$$V_{HP}=\frac{\Delta H_{HP}}{H}\times 100\% \tag{4-11}$$

式中，$\Delta H_{HP}$——侧向约束条件下所测得的轴向膨胀变形量。

（3）膨胀压力是指将试件浸水后，使试件保持原有体积的最大约束力。

5．*岩石的抗冻性指标*

描述岩石在冻融条件下的力学特性指标是岩石的抗冻性系数 $K_f$，其计算式为

$$K_f=\frac{R_f}{R_s}\times 100\% \tag{4-12}$$

式中，$R_f$——岩石冻融后的饱和单轴抗压强度；

$R_s$——岩石冻融前的饱和单轴抗压强度。

### 4.1.2　岩石的强度特性

岩石的强度是指岩石承载能力的大小，由于荷载作用的不同，通常描述岩石强度特性的指标有岩石的单轴抗压强度、抗拉强度、剪切强度、三轴压缩强度等。

1. 岩石的单轴抗压强度

岩石的单轴抗压强度是指岩石试件在无侧限条件下受轴向力作用破坏时单位面积上的荷载，即

$$R_c = P/A \tag{4-13}$$

式中，$P$——在无侧限条件下，轴向的破坏荷载；

$A$——试件与轴向荷载垂直的截面面积。

单轴抗压试验是在带有上下承压板的试验机上做的，加载条件不同，破坏形态也不相同。岩石的破坏形态主要有圆锥形破坏和柱状劈裂破坏。

(1) 圆锥形破坏，这种破坏形态主要是由于试件两端面与试验机承压板之间的摩擦力增大造成的，由于接触面上摩擦力的存在，使得端面附近出现三角形区域的压应力区，起到了一个箍的作用，中间则由于拉应力的作用自由向外变形破坏。

(2) 柱状劈裂破坏，由于采取了有效方法消除了试件端面与承压板之间的摩擦力，试件呈现出劈裂破坏的特性。

2. 岩石的抗拉强度

岩石的单轴抗拉强度是指岩石试件仅受轴向拉力作用至破坏时，单位面积所能承受的拉力。岩石试件上的拉伸荷载一般采用专制的夹具施加，夹具的力量难以控制，夹力太大，可能把试件断头夹碎，使试验终止；夹力太小，抓不住试件，夹力无法施加。另外，由于岩石试件内往往存在微裂缝，在加载过程中还可能出现随机破坏面，得不到预期的实验结果。

直接测定岩石抗拉强度的方法是将加工好的岩石试件置于专用夹具中，通过试验机对试件施加拉力至破坏，再按照下式计算岩石的单轴抗拉强度，即

$$R_t = \frac{P}{A} \tag{4-14}$$

式中，$R_t$——岩石的单轴抗拉强度；

$P$——试件受拉破坏时的极限拉力；

$A$——与所施加拉力相垂直的横截面面积。

3. 岩石的抗剪强度

岩石的抗剪强度常用莫尔-库仑公式表示

$$\tau = \sigma \tan\varphi + c \tag{4-15}$$

式中，$\sigma$——作用面上的正应力；

$\varphi$——岩石的内摩擦角；

$c$——岩石的粘聚力。

4. 岩石的三向压缩强度

实际工程中的岩体大都处于三向应力作用下，因此研究岩体在三向应力作用下的强度、变形特性更有实际意义。假三轴试验是指两个水平方向的围压值相同，假三轴试验机结构简单、花费少，是目前比较常用的试验方法。

岩石在三向压缩状态下的破坏形态与围压的大小有很大关系，而且呈现出明显不同于单向压缩状态下的破坏形式。

(1) 在低围压的情况下，主要表现为劈裂破坏，这时围压的作用并未表现出来。

(2) 在中等围压的作用下主要表现为斜面剪切破坏，破坏面与最大主应力的夹角约为 $45°+\varphi/2$。

(3) 在高围压的作用下，试件会表现出塑性流动破坏的性质，并不出现宏观上的破裂面而成腰鼓形。

围压的作用使试件的强度提高，随着围压的增大试件的破坏类型也由脆性破坏向塑性流动过渡。



## 4.2 岩石坚固性分级

### 4.2.1 岩石坚固性概述

1. M·M·普洛托奇雅可诺夫观点

普洛托奇雅可诺夫认为，岩石坚固性是一种抵抗外力的性能，反映各种采掘作业的难易程度，即在凿岩、爆破工作时，或用某种工具(像镐、铲之类)直接进行挖掘时的难易程度。假如一种岩石在某一方面(如凿岩)的坚固性和另一种岩石的坚固性的比值是 $f_1:f_2$，那么在其他方面 (如爆破)坚固性也将有相同的比值；一种岩石在凿岩时比另外一种坚固若干倍，那么它在爆破、回转钻眼等情况下也都坚固同样的倍数，岩石在所有这些方面都具有一个比例系数。坚固性系数就是岩石间相对坚固性在数量上的表现，岩石坚固性在各方面的表现趋于一致。

2. A·Φ·苏哈诺夫的观点

苏哈诺夫认为，开采矿床时确定岩石坚固性，是用它来正确地决定劳动生产率、制定定额和选用机械。因此，一切抽象地进行岩石分级的方法都没有发展采矿业的实际意义。岩石相对坚固性表征着该岩石在分级中所占的地位，这种分级与生产过程中破碎岩石相联系的各种有效性相关。所有的有效性分为下列指标：①破碎进行的速度；②生产效率；③能量和材料的消耗；④马达的载荷；⑤工具的损坏和磨损。

岩石的坚固性与破碎方法相关，并随着后者的改变而改变。在决定岩石坚固性时，为了取得最现实的结果，必须建立在这样一种基础上，就是测定岩石中所引起的抵抗力，要和生产过程中破碎岩石的方法所引起的作用效果相同。在选择岩石坚固性测定方法的时候，必须注意到这一岩石的采掘方法。对有多种采掘方法的岩石，坚固性应当是不同的，

决定岩石坚固性的基础是在每一特定情况下实际应用的具体采掘方法。

苏哈诺夫得到如下结论：生产过程自身充当决定岩石坚固性的方法；决定岩石坚固性的基础应当是用现实的具体采掘方法；必须沿着具体的途径去决定岩石的坚固性，也就是建立相应的等级，如凿岩性等级、爆破性等级等；岩石坚固性系数应当是有数量级的，它表征着在特定的工作条件下岩石的可采性。

3. П·И·巴隆的观点

巴隆认为，必须将岩石抵抗破碎的评定按其任务区分成几类。可以初步设想区分成以下 3 类。

（1）抵抗破碎能力的总评定，或岩石在各种生产过程中的坚固性。这种评定对一般机械化方向的选择、工艺方案的确定、矿山设计中许多问题的解决、全盘规范的拟定、每班工作量的计算等方面都是需要的。上述目的所需要的正是总的评定。

（2）每种破碎工序较准确的评定，这种评定对于各种采掘机械是必要的，确定最优工作规范和合理适用范围，以及制定技术定额，都需要有这种评定。

（3）科学研究工作个别任务的评定，它是和研究破碎岩石理论问题及给出新的计算方法相联系着的。

巴隆认为，只能以综合性指标为基础，利用开采工艺特定的岩石坚固性系数，才能给出实际工程计算所能接受的精度要求。在确定综合性质的指标时，得出的结果要符合统计上可靠性的要求。欲增加岩石开采工艺的工程计算精度，不能只是像平常所做的那样，只给出相应的平均指标，并且一定还要有这些指标的统计分布情况。自然，这种条件下要利用计算机来进行计算，这正是实际系统工程分析时，所必须采用的方法。对于岩石这样一种不均质又多变化的介质，在采取工程计算时，给出材料性质的统计分布情况，将意味着把采矿科学的重要领域提高到崭新的、更高的水平。

在一般情况下，问题的实质是寻求一种准确的预估方法，能够在使用某种工具，在不同工作条件下，破碎各种岩石时确定所受的力和能耗指标。如果每种岩石按所研究的破碎方法，在计算公式中代入某些普遍的(综合的)抗力的特征量的数值，所得到的结果又和实际相符合，那么任务就算完成了。这样一来，问题的症结就在于寻求某种始终不变的比例关系，也即岩石按给定破碎方法下的抗力特征量数值，代入比例关系式时，对于各种岩石来说，是个不变量。这样的一种比例关系，考虑到自然界的统计规律，岩石破碎抗力指标显然具有相关性质，这就是相关比不变性原则的实质。为了实现这一原则，显然要研究作为破碎对象的岩石性质，必须把岩石性质的研究和破碎过程的研究结合起来，把研究岩石的抗力特征和这种破碎过程在科学方法意义下的指标结合起来，即作为一个综合体来研究。

### 4.2.2 岩石坚固性分级概述

1. 抗压强度法

将岩石切成 $5\times5\times5\text{cm}^3$ 的立方体，用材料试验机测定其抗压强度，利用抗压强度计算岩石的坚固性系数，普洛托奇雅可诺夫的计算方法如下

$$f=R_C/10^7 \tag{4-16}$$

式中，$f$——岩石坚固性系数，又称普氏系数；

$R_C$——岩石的单轴抗压强度，Pa。

根据Π·И·巴隆的研究，按式(4-16)确定的坚固性系数，对软岩偏低，对硬岩偏高，他提出的修正公式如下

$$f=R_C/(3\times10^7)+[R_C/(3\times10^6)]^{0.5} \tag{4-17}$$

2. 捣碎法

捣碎法是给岩石碎块施加一定的夯捣冲击功，用产生的粉末量计算岩石的坚固性系数 $f$，其计算公式如下

$$f=20n/l \tag{4-18}$$

式中，$n$——重锤投掷次数；

$l$——量筒内 0.5mm 以下岩石粉末高度，mm。

1）不规则试块法

鉴于制作标准试块相当困难，因此，人们研究了一种利用不规则试块的抗压裂强度计算岩石坚固性系数 $f$ 的方法；取其体积约为 100cm³ 略呈球形的岩块放在材料试验机的两平板支座间，施加压力直到岩石块开裂为止，则压裂强度 $R_r$ 为

$$R_r=P/V^{2/3} \tag{4-19}$$

式中，$R_r$——不规则试件的压裂强度，Pa；

$P$——试件减压坏时的载荷，N；

$V$——试件的体积，m³。

岩石的坚固性系数为

$$f=R_r/(19\times10^5) \tag{4-20}$$

2）综合平均方法

规则试件的抗压强度代表岩石发生剪切破坏时的承载能力，而不规则试件的压裂强度代表岩石发生拉伸破坏时的承载能力。因此，为能够较精确地反映岩石的坚固性，可按抗压强度法和不规则试块法分别计算岩石坚固性系数，然后取其平均值，即

$$f=R_C/(6\times10^7)+[R_C/(12\times10^6)]^{0.5}+R_r/(19\times10^5) \tag{4-21}$$

普洛托奇雅可诺夫岩石坚固性分级表见表 4-2。



**表 4-2　普洛托奇雅可诺夫岩石坚固性分级表**

| 等级 | 坚固性程度 | 岩石 | $f$ |
|---|---|---|---|
| Ⅰ | 最坚固 | 最坚固、致密和有韧性的石英岩和玄武岩，其他各种特别坚固的岩石 | 20 |
| Ⅱ | 很坚固 | 很坚固的花岗质岩石，石英斑岩，很坚固的花岗岩，矽质片岩，比上一级较不坚固的石英岩，最坚固的砂岩和石灰岩 | 15 |
| Ⅲ | 坚固 | 花岗岩(致密的)和花岗片岩石，很坚固的砂岩和石灰岩，石英质矿脉，坚固的砾岩，极坚固的铁矿 | 10 |
| Ⅲa | 坚固 | 石灰岩(坚固的)，不坚固的花岗岩，坚固的砂岩，坚固的大理石岩和白云岩、黄铁矿 | 8 |

（续）

| 等级 | 坚固性程度 | 岩石 | *f* |
| --- | --- | --- | --- |
| Ⅳ | 较坚固 | 一般的砂岩、铁矿 | 6 |
| Ⅳa | 较坚固 | 砂质页岩，页岩质砂岩 | 5 |
| Ⅴ | 中等 | 坚固的粘土质岩石，不坚固的砂岩和石灰岩 | 4 |
| Ⅴa | 中等 | 各种不坚固的页岩，致密的泥灰岩 | 3 |
| Ⅵ | 较软弱 | 较软弱的页岩，很软弱的石灰岩，白垩，岩盐，石膏，冻土，无烟煤，普通泥灰岩，破碎的砂岩，胶结砾石，石质土壤 | 2 |
| Ⅵa | 较软弱 | 碎石质土壤、破碎的页岩、凝结成块的砾石和碎石、坚固的煤、硬化的粘土 | 1.5 |
| Ⅶ | 软弱 | 粘土(致密的)、软弱的烟煤，坚固的冲积层、粘土质土壤 | 1.0 |
| Ⅶa | 软弱 | 轻砂质粘土、黄土、砾石 | 0.8 |
| Ⅷ | 土质岩石 | 腐殖土、泥煤、轻砂质土壤、湿砂 | 0.6 |
| Ⅸ | 松散性岩石 | 砂、山麓堆积、细砾石、松土、采下的煤 | 0.5 |
| Ⅹ | 流沙性岩石 | 流沙、沼泽土壤、含水黄土及其他含水土壤 | 0.3 |

**小知识**

岩石坚硬程度定量指标用岩石单轴饱和抗压强度表示，一般采用实测值，若无实测值，可采用实测的岩石点荷载强度指数和换算值。



## 4.2.3 煤系地层岩石坚固性概况

煤系地层的岩石主要是沉积岩，局部有岩浆岩侵入；煤层的顶底板岩石主要有粘土岩(泥岩)、石灰质页岩、砂质页岩 、砂岩、石灰岩，有时可见砾岩，如图4-2所示。

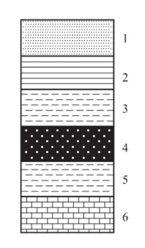



**图4-2 煤系地层柱状图**

1—老顶；2—直接顶；3—伪顶；4—煤层；5—直接底；6—老底

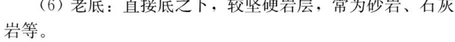
(1) 老顶：位于直接顶上方一定距离内的厚而硬的的岩层，有时也可以直接位于煤层之上，常由砂岩、石灰岩和砂砾岩组成。

(2) 直接顶：位于伪顶上的一层或层岩层，常由页岩、砂质页岩组成。

(3) 伪顶：位于煤层之上，厚度不大，常为碳质页岩。

(4) 煤层。

(5) 直接底：直接位于煤层下面的岩层，常见为各种页岩或泥岩。



(6) 老底：直接底之下，较坚硬岩层，常为砂岩、石灰岩等。

我国若干煤田顶底板岩石强度特征见表4-3。

表 4-3 我国若干煤田顶底板岩石的坚固性

| 岩石类型 | | 抗压强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 抗剪强度/MPa | 坚固性系数 $f$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 砂岩类 | 细砂岩 | 106～146 | 5.6～18 | 17.8～54.5 | 10～15 |
| | 中粒砂岩 | 87.5～136 | 6.1～14.3 | 13.6～37.2 | 9～14 |
| | 粗砂岩 | 58～126 | 5.5～11.9 | 12.6～31.0 | 6～12 |
| | 粉砂岩 | 37～56 | 1.4～2.5 | 7～11.7 | 4～6 |
| 砾岩类 | 砂砾岩 | 71～124 | 2.9～9.9 | 7.2～29.1 | 7～12 |
| | 砾岩 | 82～96 | 4.1～12 | 6.7～26.9 | 8～10 |
| 页岩类 | 砂质页岩 | 40～92 | 4～12.1 | 21～30.5 | 4～9 |
| | 页岩 | 19～40 | 2.8～5.5 | 19～23.8 | 2～4 |
| 灰岩类 | 石灰岩 | 51～161 | 7.9～14.1 | 19～23.8 | 5～16 |

在煤系地层中，某些岩石中含有大量的蒙脱石、伊利石和高岭石等成分，以泥岩、凝灰岩、粘土岩、页岩等为常见，掘进时遇风，见水或爆破震动后即膨胀、泥化和松动，在地应力影响下，给巷道以很大压力，使巷道变形、支护开裂甚至垮落。

在煤系地层中，同一种岩石，在不同矿区，岩石的坚固性相差很大，有些矿区比较松软，而有些矿区比较坚硬。

**小知识**

岩石分级的综合评判方法宜采用两步分级，并按以下顺序进行。

(1) 根据岩石的坚硬程度和岩体完整程度两个基本要素的定性特征和定量的岩体基本质量指标 BQ，综合进行初步分级。

(2) 对岩石进行详细定级时，应在岩体基本质量分级基础上考虑修正因素的影响，修正岩体基本质量指标值。

(3) 按修正后的岩体基本质量指标(BQ)，结合岩体的定性特征综合评判、确定围岩的详细分级。



## 4.3 岩石可爆性分级

### 4.3.1 岩石可爆性分级概述

岩石可爆性是指岩石对爆破作用的抵抗或爆破岩石的难易性。岩石可爆性分级是根据岩石可爆性的定量指标，将岩石划分为爆破性难易的等级。它是制定爆破定额、选择爆破参数、进行爆破设计的重要依据，并为建立统一的爆破工程优化计算体系提供基础资料。岩石可爆性分级也是矿山企业管理的科学依据之一。

岩石可爆性分级与其他岩石分级一样，选择、确定分级的判据和指标是对岩石做出科学分级的关键。国内外研究者已经做了大量工作，根据岩石爆破性的主要影响因素，提出了许多不同的判据和指标以及分级方法。其中主要判据包括岩石强度、单位炸药消耗量、

工程地质参数、岩石的弹性波速度、岩石波阻抗、爆破岩石质点位移、临界速度、爆破功指数、岩石弹性变形能系数等。但是，由于炸药爆炸瞬间产生巨大的能量，以及岩石结构的复杂性，加之测试手段尚未完善等，因此，一个完整的岩石分级体系以及体系的生产应用和实施，还有待进一步的研究。目前，还没有一种公认的岩石爆破性分级方法，煤矿设计和生产中仍沿用普氏分级法。

## 4.3.2　可爆性单因素分级

1. A·H·哈努卡耶夫按波阻抗分级

岩石的波阻抗是纵波速度和岩石密度的乘积。它意味着爆破时岩石质点产生的单位运动速度，岩石中所能衍生应力的大小。前苏联的A·H·哈努卡耶夫研究了岩石的波阻抗作为爆破性分级依据，是研究岩石爆破性的一大进展，因为这种指标是在现场岩体中测定的，并且测试仪器和测试方法比较简单。大量实验研究表明，岩体的波阻抗不仅与岩石的物理力学性质有关，而且还取决于岩石的裂隙构造特征。表4-4列出了按波阻抗岩石的可爆性分级指标。



**表4-4　哈努卡耶夫的岩石可爆性分级**

| 裂隙等级 | 裂隙程度 | 天然裂隙平均间距/m | 岩体成块形程度 | A/V | 普氏坚固性系数 $f$ | 容重/(kN/m³) | 波阻抗/(Mkg/m²s) | 岩体内诸结构体块度含量/% | | | 炸药单耗(kg/m³) | 岩石可爆性 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | +300 | +700 | +1000 | | |
| Ⅰ | 极度裂隙 | <0.1 | 碎块 | 33 | <8 | <25 | <5 | <10 | 0 | 0 | <0.35 | 易爆岩石 |
| Ⅱ | 强烈裂隙 | 0.1～0.5 | 中块 | 33～9 | 8～12 | 25～26 | 5～8 | 10～70 | 0～30 | 0～5 | 0.35～0.45 | 中等可爆岩石 |
| Ⅲ | 中等裂隙 | 0.5～1.0 | 大块 | 9～6 | 12～16 | 26～27 | 8～12 | 70～90 | 30～70 | 5～40 | 0.45～0.65 | 难爆岩石 |
| Ⅳ | 轻微裂隙 | 1.0～1.5 | 很大块 | 6～2 | 16～18 | 27～30 | 12～15 | 100 | 70～90 | 40～70 | 0.65～0.90 | 很难爆岩石 |
| Ⅴ | 极少裂隙 | >1.5 | 特别大块 | 2 | ≥18 | ≥30 | >15 | — | — | 70～100 | ≥0.90 | 特难爆岩石 |

注：①A/V为1m³岩石中自然裂隙的面积；②$f$为普氏坚固性系数。

2. B·K·鲁勃佐夫估计爆破块度的分级

露天爆破对爆破岩石块度有一定的要求，不同的炸药单耗会产生不同的大块率。鲁勃佐夫规定标准爆破条件如下：炮孔直径不大于0.02倍台阶高度，单排齐发爆破孔不少于5个，超深不大于0.15倍底盘抵抗线，炮孔临近系数为1，采用6号防水硝铵炸药，连续装药，填塞系数0.5，瞬时起爆。爆破块度大于500mm而未被破碎的岩石作为大块标准。为消灭大块，必须按比例增加炸药单耗，因此炸药单耗可用式(4-22)表示

$$q_0=q_H V/(V-V_H) \tag{4-22}$$

式中，$q_0$——设想爆破后没有大块的炸药单耗，它可作为岩石可爆性分级指标，kg/m³；

$q_H$——上述标准条件下的炸药单耗，$kg/m^3$；

$V$——岩体中结构体块度大于500mm的相对含量，%；

$V_H$——标准条件下炸药单耗为 $q_H$ 时，产生块度大于500mm的相对含量，%。

按炸药单耗 $q_0$ 值，鲁勃佐夫将岩石分成5级，见表4-5。这种分级的特点是估计到了岩体中结构的块度和爆破块度。

**表4-5　鲁勃佐夫岩石可爆性分级**

| 级别 | 可爆性 | $q_0$ /($kg/m^3$) | 典型岩石 | 裂隙等级 | 普氏坚固系数 $f$ | 岩石容重 /($kN/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ⅰ | 易爆 | <0.35 | 花岗闪长斑岩 | Ⅰ | 5～8 | 24.5～25.5 |
| Ⅱ | 中等 | 0.35～0.6 | 变异的二长闪长岩 | Ⅱ—Ⅲ | 3～6 | 24.5～25.5 |
| Ⅲ | 难爆 | 0.6～0.9 | 花岗岩 | Ⅲ—Ⅳ | 10 | 26.5 |
| Ⅳ | 难爆 | 0.6～0.9 | 石灰岩 | Ⅲ—Ⅳ | 6～7 | 25.5 |
| Ⅴ | 很难爆 | 0.9～1.2 | 铁矿岩 | Ⅳ | 10～12 | 34.3 |
| Ⅵ | 特难爆 | >1.2 | 角闪岩 | Ⅴ | 10～12 | 31.4 |
| Ⅶ | 特难爆 | >1.2 | 次生石英岩 | Ⅴ | 6～8 | 27.4～31.4 |



3. B·B·里热夫斯基按标准炸药消耗量 $q$ 分级

前苏联科学院院士里热夫斯基建议岩石的可爆性用标准炸药消耗量 $q$ 来确定，而 $q$ 与裂隙密切相关，裂隙性可用下列系数计算

$$K_1=1.2d+0.2 \tag{4-23}$$

式中，$d$——表示裂块的平均尺寸，m。

按下列关系式确定岩石爆破破碎的相对难度：

$$K=0.1K_1(R_c+R_t+R_s)+40\rho \tag{4-24}$$

式中，$R_c$——岩石的抗压强度；

$R_t$——岩石的抗拉强度；

$R_s$——岩石的抗剪强度；

$\rho$——岩石的密度。

表4-6列出了里热夫斯基的岩石可爆性分级，表中的标准炸药单耗，是指在 $1m^3$ 的岩块中心，装6号防水硝铵炸药，进行模拟爆破所得数值。

**表4-6　里热夫斯基岩石可爆性分级**

| 岩石可爆性等级 | 标准炸药单耗/($kg/m^3$) | 岩石可爆性 |
|---|---|---|
| Ⅰ | 0.2 | 易爆岩石 |
| Ⅱ | 0.21～0.4 | 中等岩石 |
| Ⅲ | 0.41～0.6 | 难爆岩石 |
| Ⅳ | 0.61～0.8 | 很难爆岩石 |
| Ⅴ | 0.81～1.0 | 极难爆岩石 |

4. C·W·利文斯顿最优爆破漏斗指标

美国C·W·利文斯顿研究松动爆破漏斗规律时，制订了一种通过爆破漏斗实验确定岩石可爆性的方法。利文斯顿采用最小抵抗线和炸药量的立方根成正比的关系。当自由面刚产生破碎的临界状态时，用$E_b$表示其比例系数

$$W_c=E_b\sqrt[3]{Q} \tag{4-25}$$

式中，$W_c$——临界最小抵抗线，即自由面产生破碎时的药包最大埋藏深度，m；

$Q$——炸药量，kg；

$E_b$——比例系数。

$E_b$的大小取决于岩石的爆破性，它和岩石的变形耗能有关。岩石临界破碎时，炸药的爆炸能量大部分转化成岩石的变形能，当变形超过某一限度，岩石开始破碎。

爆破漏斗体积$V$和炸药量$Q$的比值为$V/Q$，即单位炸药量爆破岩石的体积，它是最小抵抗$W$的函数，使得$V/Q$最大的最小抵抗称为最优抵抗

$$W_0=\Delta_0 W_c=\Delta E_b\sqrt[3]{Q} \tag{4-26}$$

式中，$W_0$——最优抵抗，m，

$\Delta_0$——最优埋值系数，$\Delta_0=(W/W_c)_0$，即$V/Q$最大时的$W/W_c$。

表4-7列出了利文斯顿爆破漏斗指标。



表4-7 利文斯顿爆破漏斗指标

| 岩石名称 | $E_b$ | $\Delta_0$ | 炸药名称 |
|---|---|---|---|
| 硬砂岩 | 1.58 | 0.54 | 硝化甘油 |
| 磁铁矿 | 1.72 | 0.45 | 硝化甘油 |
| 冻结的铁矿层 | 1.13 | 0.83 | 铵油炸药 |
| 冻土 | 0.77 | 0.93 | 铵油炸药 |
| 黄铁铅锌矿 | 1.98 | 0.42 | 乳化炸药 |

### 4.3.3 可爆性多因素分级

1. B·H·库图佐夫综合可爆性分级

这种分级方法综合了炸药单耗、岩石坚固性和岩体裂隙等多方面因素，以炸药单耗为主。炸药单耗的标准条件是：台阶高度10～15m，炮孔直径243mm，铵梯炸药，爆热4190kJ/kg。大量统计资料表明，炸药单耗的离差(均方差)和炸药单耗的2/3次方成正比

$$\sigma=0.117q^{2/3} \tag{4-27}$$

式中，$\sigma$——炸药单耗统计值的离差，kg/m$^3$；

$q$——炸药单耗，kg/m$^3$。

在制定分级范围时，由式(4-28)和式(4-29)给出

$$q_u=q+0.117q^{2/3} \tag{4-28}$$

$$q_d=q-0.117q^{2/3} \tag{4-29}$$

式中，$q_u$、$q_d$——某一级的炸药单耗上下限，kg/m$^3$；

$q$——这一级的炸药单耗分布中心，即平均值，kg/m³。

库图佐夫的综合岩石可爆性分级见表 4-8。

**表 4-8　库图佐夫的综合岩石可爆性分级**

| 爆破性分级 | 炸药单耗/(kg/m³) | | 岩体自然平均间隙/m | 岩体中各种结构体含量/% | | 抗压强度/MPa | 岩石容重/(kN/m³) | 普氏分级和普氏系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 范围 | 平均 | | +500mm | +1500mm | | | |
| Ⅰ | 0.12～0.18 | 0.15 | <0.10 | 0～2 | 0 | 10～30 | 14～18 | Ⅶ～Ⅵ (1～2) |
| Ⅱ | 0.18～0.27 | 0.225 | 0.10～0.25 | 2～16 | 0 | 20～45 | 17.5～23.5 | Ⅵ～Ⅴ (2～4) |
| Ⅲ | 0.27～0.38 | 0.320 | 0.20～0.50 | 10～52 | 0～1 | 30～65 | 22.5～25.5 | Ⅴ～Ⅳ (4～6) |
| Ⅳ | 0.38～0.52 | 0.450 | 0.45～0.75 | 45～80 | 0～4 | 50～90 | 25～28 | Ⅳ～Ⅲ (6～8) |
| Ⅴ | 0.52～0.68 | 0.600 | 0.70～1.00 | 75～98 | 2～15 | 70～120 | 27.5～29 | Ⅲa～Ⅲ (8～10) |
| Ⅵ | 0.68～0.88 | 0.780 | 0.95～1.25 | 96～100 | 10～30 | 11～16 | 28.5～30 | Ⅲ～Ⅱ (10～15) |
| Ⅶ | 0.88～1.10 | 0.990 | 1.20～1.50 | 100 | 25～47 | 14.5～20.5 | 29.5～32 | Ⅱ～Ⅰ (15～20) |
| Ⅷ | 1.10～1.37 | 1.235 | 1.45～1.70 | 100 | 43～63 | 19.5～25 | 31.5～34 | Ⅰ(20) |
| Ⅸ | 1.37～1.68 | 1.525 | 1.65～1.90 | 100 | 58～78 | 23.5～30 | 33.5～36 | Ⅰ(20) |
| Ⅹ | 1.68～2.03 | 1.855 | ≥1.85 | 100 | 75～100 | ≥28.5 | ≥35.5 | Ⅰ(20) |



2. 钮强等人的岩石可爆性综合分级

该分级方法主要考虑了爆破漏斗体积、爆破块度分布状况及岩石波阻抗和岩石可爆性的关系。标准条件如下：在测定分级矿山爆破现场直接选择有代表性的岩石地段，在比较完整的具有一个自由面的岩体上，垂直钻孔，炮孔直径 45mm，孔深 1m，孔间距 2m；采用 2 号岩石硝铵炸药，每孔装药量 0.45kg，连续装药，炮泥填塞，1 支 8 号雷管起爆。测试方法：装药前用声波仪测定岩体弹性纵波速度。装药爆破后测定爆堆岩石的大块率（大于 300mm 为大块）、小块率（小于 50mm 为小块）、平均合格率（50～100mm，100～200mm 和 200～300mm 的块度累计平均值），并测定和核算爆破漏斗的体积．

经过对我国 63 种岩石的爆破试验，应用数理统计方法对矿山实际试验所得数据的爆破漏斗体积（$V$，m³），爆破漏斗体岩石大块率（$K_g$，%），小块率（$K_s$，%），平均合格率（$K_e$，%），岩体被阻抗（$\rho c_p \times 10^6$，kg/m²·s）与岩石可爆性指数 $N$ 之间的关系进行多元化回归分析，计算结果如下

$$N=\ln\left[\frac{\exp(67.22)\cdot K_g^{7.42}\cdot 1.01(\rho c_p)^{2.09}}{\exp(38.44V)\cdot K_s^{4.75}\cdot K_e^{1.89}}\right] \tag{4-30}$$

于是，按照岩石爆破性指数 $N$ 值大小，将岩石爆破性分为 5 级，每级又分为两个亚级，具体分级结果见表 4-9。

**表 4-9 钮强等人的岩石可爆性分级**

| 爆破等级 | | 爆破性指数 $N$ | 可爆性 | 代表性岩石 |
|---|---|---|---|---|
| Ⅰ | $I_1$<br>$I_2$ | <29<br>29.001～38.000 | 极易爆 | 千枚岩、破碎性砂岩、泥质板岩、破碎性白云岩 |
| Ⅱ | Ⅱ$_1$<br>Ⅱ$_2$ | 38.001～46.000<br>46.001～53.000 | 易爆 | 角砾岩、泥沙岩、米黄色白云岩 |
| Ⅲ | Ⅲ$_1$<br>Ⅲ$_2$ | 53.001～60.000<br>60.001～68.000 | 中等 | 阳起石石英岩、黄斑岩、大理岩、灰白色白云岩 |
| Ⅳ | Ⅳ$_1$<br>Ⅳ$_2$ | 68.001～74.000<br>74.001～81.000 | 难爆 | 磁性石英岩、角闪斜长片麻岩 |
| Ⅴ | Ⅴ$_1$<br>Ⅴ$_2$ | 81.001～86.000<br>>86 | 极难爆 | 矽卡岩、花岗岩、矿体浅色砂岩 |



3. 岩体可爆性分级的灰色系统理论简介

1）分级指标的选取

影响岩石可爆性的因素很多，以任何一个单因素进行分级都很难达到全面、合理的工程要求。将岩石的坚固性系数 $f$、岩石的波阻抗、炸药单耗和岩体平均裂隙间距作为岩石可爆性的评判指标，见表 4-10。

**表 4-10 岩石可爆性的评判指标**

| 典型类别 $K$ | 普氏系数 $f$ | 波阻抗 /($10^6$ · kg/m$^2$s) | 单耗 /(kg/m$^3$) | 平均裂隙距 /m | 可爆性 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ⩽8 | ⩽5 | ⩽0.35 | ⩽0.1 | 易爆 |
| 2 | 8～12 | 5～8 | 0.35～0.45 | 0.1～0.5 | 中等 |
| 3 | 12～16 | 8～12 | 0.45～0.65 | 0.5～1.0 | 难爆 |
| 4 | 16～18 | 12～15 | 0.65～0.9 | 1.0～1.5 | 很难爆 |
| 5 | ⩾18 | ⩾15 | ⩾0.9 | ⩾1.5 | 极难爆 |

2）岩石可爆性的灰色聚类分级

设记 $k$=1、2、3、4、5 为典型类别，$i$= Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ为聚类元素，$j$=$1^{\#}$、$2^{\#}$、$3^{\#}$、$4^{\#}$为聚类指标。灰色聚类分级法就是区分聚类元素在聚类指标下的所属类别。

首先根据对岩石可爆性分级的研究成果和习惯，把岩石按可爆性难易程度分为典型的 5 类，即易爆、中等、难爆、很难爆和极难爆；并按灰色系统理论将其视为典型类别 $k$，$k${1，2，3，4，5}。把影响岩石可爆性的因素归纳为 4 个指标视为聚类指标 $j$，$j${$1^{\#}$，$2^{\#}$，$3^{\#}$，$4^{\#}$}；并把要评判的岩体视为聚类元素 $i$，$i${Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ}。

聚类分析具体步骤如下。

（1）规定功效函数 $y_{kj}(x)$，即将聚类指标 $j$ 按"功能效益"对典型类别 $k$ 规定效果的白化函数。

（2）求标准权 $\eta_{kj}$。

$$\eta_{kj} = \lambda_{kj(2)} \Big/ \sum_{j=1^{\#}}^{4^{\#}} \lambda_{kj(2)} \tag{4-31}$$

式中，$\lambda_{kj(2)}$——$X$ 对应于 $y_{kj(2)}$ 上的某个特定值。

（3）确定实际权。

$$\sigma_{ik} = \sum_{j=1^{\#}}^{4^{\#}} y_{kj}(x_{ij}) \cdot \eta_{kj} \tag{4-32}$$

式中，$\sigma_{ik}$——聚类系数；

$\sigma_i$——聚类向量。

（4）岩石可爆性级别的划分。

求聚类向量 $\sigma_i$ 中最大元素 $\sigma_{jk}^{\#}$

$$\sigma_{jk}^{\#} = \max\{\sigma_i\} \tag{4-33}$$

这样，聚类元素即该岩石应属于的级别。

除此之外，在进行岩石可爆性分级时，还可以采用人工神经网络方法和模糊综合评判方法。



# 4.4 钻眼方法与破岩机理

## 4.4.1 钻眼方法分类

钻眼是采矿、巷道和隧道掘进等岩土工程施工作业中的一个基本工序，是利用一定的机械工具对岩石进行局部破碎，然后清除掉被破碎的岩屑，使新的岩面暴露出来，以便不断地破碎岩石，并在岩石中形成一定直径和深度的圆柱状孔洞，即炮眼。钻凿出来的炮眼主要用于装填炸药，以便爆破破碎岩石。钻凿眼孔还有其他用途，如进行地质勘探、煤矿井下探水、煤层释放瓦斯、巷道安装锚杆、锚索等项工作。

按破岩方法，可将钻眼方法分为物理方法、化学方法和物理化学方法三大类。采用不改变岩石组成和其性质的破岩方法进行钻眼称为物理方法。物理方法又分为机械方法、热力方法和电物理方法 3 种类型。机械方法即利用机械力的作用，在岩石内产生应力使之破碎的方法。目前工业应用的破岩方法主要是普通机械方法，其他钻眼方法尽管很多，但大多数还处于试验阶段，很少能在工业实际中应用。

1. 普通机械方法

采用普通机械方法破碎岩石，按工具在钻孔底破碎岩石的机理不同，又可分为冲击、切削、滚压和磨削 4 种类型。

（1）冲击式凿岩是机械垂直于岩石表面施加作用力，其钻头也是垂直于表面向岩石内运动，并在岩石表面下形成一个破碎漏斗坑。

（2）切削式凿岩是机械在施加一个扭转力的同时，还向钻头施加一个固定的轴向力，钻头平行于岩石表面运动，从而破碎其前方的岩石。

（3）滚压式凿岩是机械同时对钻头施加旋转力和冲击力，使钻头与岩石表面呈一定角度的方式向岩石内运动，从而破碎其斜下方的岩石。

（4）磨削式凿岩一般采用金刚石钻头在轴向力和扭转力的共同作用下，在岩石表面磨削，并在岩石内形成圆环状孔洞，这种破岩方式常用于取岩芯钻。

上述 4 种破岩方式如图 4－3 所示。

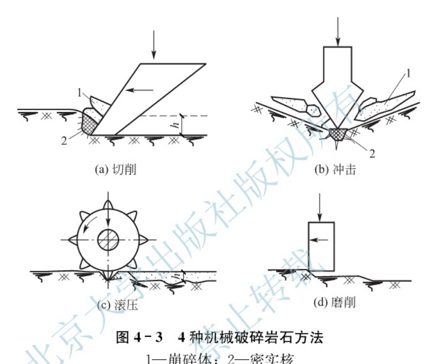




**图 4－3　4 种机械破碎岩石方法**

1—崩碎体；2—密实核

2. 特殊机械方法

除了上述 4 种普通机械钻眼方法外，国内和国外已经制造和试验了许多新型特殊的机械钻机，如磨蚀钻机、高压水射流侵蚀钻机、挤压爆破钻机，超声波钻机等。这类钻机的钻具均能产生极高的集中应力使岩石发生破坏。在硬岩中，其钻速相对比普通机械钻机快，但这类钻机能耗高，输出功率低，限制了它们的应用。但这类钻机的破岩方式和设计理念为新型钻机的研制提供了思路。例如，高压水射流配合全断面钻机的方法可大大提高钻机在硬岩的钻进效率。

3. 热力方法

热力钻机是将岩石表面加热到数百到上千度高温，在岩石中产生热应力，进而引起岩石表面“剥落”的方法进行破岩。如火钻、强力火钻、高频电流钻机、电感应钻机等。许多岩石不具备剥落性，限制了这类钻机的应用。火钻主要应用于热传导性好的金属矿物类硬岩。这类钻机需要有很高的能耗和输出功率。（火钻主要利用氧气和柴油燃烧产生高温，因此这种钻机也属于物理化学方法。）

还有一种熔融气化钻机，（这类钻机也属于电物理方法）这类钻机产生的温度更高，可将岩石熔融气化，以达到钻孔的目的。如熔融钻机、电弧钻机、等离子钻机、激光钻机

等。这类钻机的能耗极高，但钻速并不高，因此，也限制了应用。

4. 化学方法

化学方法钻机主要使用剧烈反应的化学药剂溶解岩石，以达到破岩钻孔的目的。常用的药剂主要为化学反应活泼的氟化物，这类钻机利用高压气体将氟化物吹向岩石，使岩石腐蚀、溶解，从而形成钻孔。由于在钻孔过程中控制、运输、安放大量反应活泼的化学药剂有很多困难，因此，这类钻机应用范围极为有限。

## 4.4.2 冲击破岩机理

冲击破岩是应用最广泛一种机械破岩方式，适用于各类中硬和坚硬的岩石。其特点是利用钻具产生的冲击力使岩石发生破碎。冲击过程一般分两步，首先使钻头侵入岩石，然后造成钻头周围岩石的块状崩落。因此，钻头或压头侵入岩石是冲击破碎岩石的一个最基本过程。

压头侵入岩石时，存在下述一些普遍的特征。

(1) 压头侵入岩石时，在压头的前方均要出现一个袋状和球状的核。它是物体在承受巨大的压力作用下，发生局部粉碎或显著变形而形成的，称为密实核。无论什么样的工具、载荷或材料，压头前方均出现密实核现象。如图 4-4 所示。

(2) 压头侵入岩石的另一个普遍特点是侵入深度不随载荷增长而均衡地增加，而是在加载初期，侵入深度按一定比例增加，当达到某一临界值时，发生突然跃进现象。这时，密实核旁侧的岩石出现崩碎，载荷暂时下跌，压头侵入到一个新的深度后，载荷再度上升，侵深和载荷又恢复到某种比例关系，如图 4-5 所示。如此循环不已，载荷—侵深曲线一般呈波浪形。

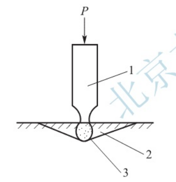



图 4-4　压头下岩石的破碎

1—压头；2—碎裂区；3—密实核

(3) 压头侵入后，形成漏斗坑的破碎角的角度变化不大，即岩石在压头作用下发生跃进式侵入之后，崩碎的岩石坑呈漏斗形状，其漏斗坑的顶角的变化不大，如图 4-6 所示。一般漏斗坑顶角保持为 120°～150°。各类岩石的破碎角见表 4-11。

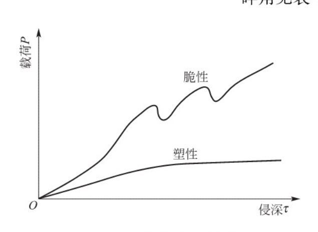



图 4-5　载荷-侵深曲线

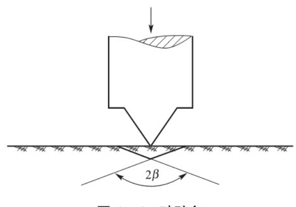



图 4-6　破碎角

表 4-11 一些岩石的自然破碎角

| 岩石 | 软粘土页岩 | 粘土页岩 | 致密石灰岩 | 软砂岩 | 硬砂岩 | 粗粒大理岩 | 玄武岩 | 辉绿岩 | 细粒花岗岩 | 硬石英岩 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| $2\beta$ | 116° | 128° | 116° | 130° | 144° | 130° | 146° | 126° | 140° | 150° |

## 4.4.3 切削破岩机理

切削破岩是主要用于软岩破碎的一种机械破岩方法，其特点是依靠钻具的轴压使钻头的钻刃侵入岩石，然后钻刃通过钻具旋转产生的切削力进行切削破岩。

岩石切削破碎现象相对比较复杂，每次岩石切削破碎过程都要经由小碎块到大碎块，而且切削力的大小与碎块粒度相对应。刀具切削岩石时先挖下的是小碎块，施加的切削力也比较小，而且在小碎块形成的瞬间，切削力要略微下降，随着切削力的增加，破碎下的岩石碎块也相应增大。经过两次或三次的破碎，最后崩裂出大碎块。在大碎块出现的瞬间，切削阻力降到零，如图 4-7 所示。

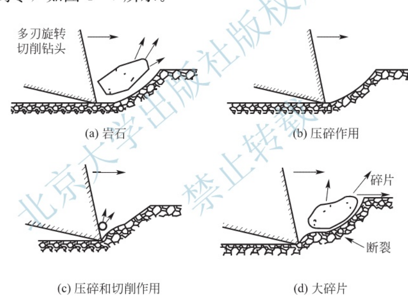





图 4-7 煤岩切削破碎过程

岩石切削破碎属于跃进式破碎，其破碎过程分为几个阶段。

1. 变形阶段

如图 4-8(a)所示。假设切削刃尖是带有一定曲率的球体(不可能做成曲率半径为零的刃尖)，按赫兹理论剪应力分布，在接触点上剪应力为零，离开该点到岩石内一定距离的剪应力达到极值，过此极值，随着离开接触点的增加而下降。最大拉应力发生在接触面边界附近的点。

2. 裂纹发生阶段

如图 4-8(b)所示。当切削力增加，$E \sim F$ 两点的拉应力超过岩石抗拉强度时，该点岩石被拉开，出现赫兹裂纹；$B$ 点剪应力超过岩石抗剪强度时，该点岩石被错开，出现剪切裂纹源。切削力所做功部分转成表面能。

3. 切削核形成阶段

如图 4－8(c)所示。切削载荷继续增加，剪切裂纹扩展到自由面与赫兹裂纹相交。岩石内已破碎的岩粉被运动的刀体挤压成密实(密度增大)的切削核，并向包围岩粉的岩壁施加压力，其中一部分岩粉以很大的速度从前刃面与岩石的间隙中射流出去。该阶段，切削力所做功除小部分转成变形能和动能外，大部分转成表面能。

压缩变形区
A
O
B
C
切削力方向
剪应力分布图
(a) 变形阶段

剪切裂纹源
赫芝裂纹
$A_1$
E
O
B
$C_1$
F
切削力方向
(b) 裂纹发生阶段

切削块
(c) 成核阶段

L
m
n
k
(d) 块体断开阶段

**图 4－8　切削破碎过程**



4. 块体崩裂阶段

如图 4－8(d)所示。载荷继续增加，刀具继续向前运动，在封闭切削核瞬间，压力超过 $LK$ 面的剪力时，发生块体崩裂，刀具突然切入，载荷瞬时下降，完成一次跃进式切削破碎过程。

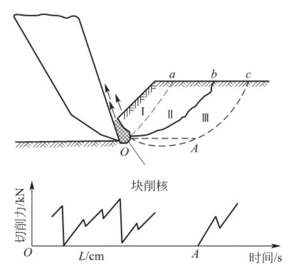


**图 4－9　切削岩石块体崩落顺序**

岩石切削时一般发生多次跃进式切削破碎过程，如图 4－9 所示。在切削刃作用下块体Ⅰ是从刃尖开始按裂隙 $Oa$ 从岩体分离下来，此时切削力并不下降到零值；如果块体Ⅱ是从刃尖开始沿 $Ob$ 线离开岩体，则切削力的起始值为块体Ⅰ的卸载值(见图中的曲线)，块体Ⅱ的卸载值高于

起始值；如果块体Ⅲ从岩体分离是按裂纹 $Oc$ 先向岩体内部发展，然后改变方向，向自由面扩展，切削力的卸载值可降为零。刀具还须在空气中(不接触岩石)走过 $OA$ 一段距离，才能开始进行新的切削。一般煤岩切削过程证实了上述 3 种切削崩裂过程，其中常见的是Ⅰ和Ⅱ两种崩裂过程。

### 4.4.4 滚压破碎岩石机理

滚压破碎岩石是破碎量大、速度快的一种机械破岩方法，其特点是靠工具滚动产生的冲击压碎和剪切碾碎作用以达到破碎岩石的目的，如图 4-10 所示。与其他几种破岩方式(冲击、切削、火钻等)相比，滚压破岩是效率较高、适应性最强的一种破岩方式，极具发展前途。滚压破岩刀具的样式较多，但基本形式为牙轮和盘刀，其他种形式可看成这两种工具的组合和发展。

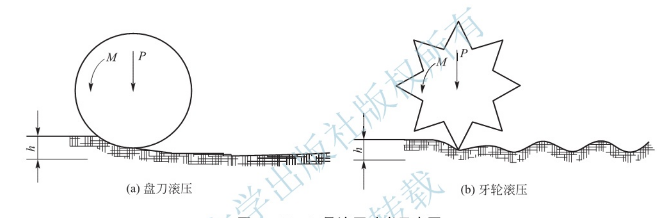




图 4-10 刀具滚压破岩示意图

岩石与钢材不同，它是由各种不同强度矿物组成的，各向异性和不均质性是它的特征，而且大多数中硬和坚硬的岩石是脆性体。滚刀在这类介质滚动时，就像大车在软硬不同的路面行使一样，软的地方压入深，硬的地方压入浅，使刀体做上下往复运动，造成对岩石的冲击。滚压破岩中剪切和碾碎作用源于如下三个方面。

(1) 滚压工具与岩石接触界面上的摩擦力，它对接触面的岩石表面产生碾碎作用。

(2) 滚压工具作圆周运动时的向心力，它对滚压工具内侧岩石产生剪切作用。

(3) 人为地造成滚刀或牙轮的滑动，从摩擦角度而言，滑动是有害的，但对塑性类的岩石，滑动有助于扩大岩石破碎面积，提高破碎效率。这种破碎岩石的过程类似切削(刮刀)，它与切削的区别是在冲击使岩石压碎成许多漏斗的条件下，工具通过滑移而使岩石破碎。

综上所述，滚压破岩既有冲击压碎、又有剪切碾碎作用的复合运动，因此给滚压破岩机理的研究造成极其复杂的困难局面。到目前为止，研究岩石破碎的学者，仅对破碎前的应力状态有明确的观点和论述，而对裂纹的发生、扩展、破碎判据、漏斗的形成等一系列问题还处于研究争论阶段。

### 4.4.5 金刚石钻头破碎机理

用嵌有细小金刚石的钻头或利用钻粒在岩石上钻孔，是一种较为特殊的破碎岩石方

式，此外，与此方式类似的还有利用铁片带着金刚砂切割岩石，或利用磨料琢磨玉石等等。这些破碎岩石方式称为研磨破碎。

1. 单粒金刚石的破岩现象

用单粒金刚石对岩石作研磨试验，其结果是金刚石在轴压作用下达到岩石体积破碎值时，岩石研磨的破碎坑为漏斗形，如图 4－11 所示。其漏斗的开阔程度与岩石脆性相关，岩石越脆，岩石破碎角越大。在同样载荷条件下，岩石越坚固，金刚石出刃侵入岩石的深度越浅。在坚硬岩石中，如花岗岩、安山岩等，金刚石压入岩石的深度很小，一般只有几微米至十几微米，但岩粉的颗粒尺寸可达到几十微米，甚至几百微米，即岩粉尺寸为侵入深度的几倍和几十倍，说明硬岩的破碎角比较大。

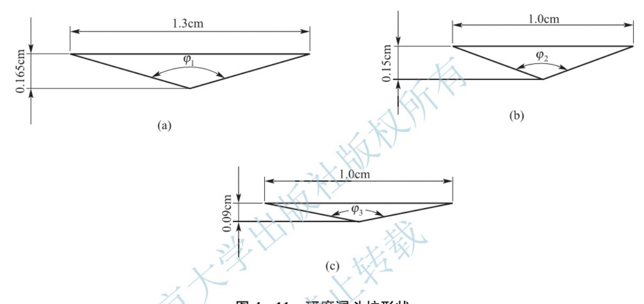




**图 4－11　研磨漏斗坑形状**

单粒金刚石破碎岩石时，在垂直力(轴向力)和水平力(切向力)联合作用下，岩石内部产生不是单纯的应力，在靠近金刚石移动的后部产生张应力，在张应力区产生的岩粉最多，由于张应力存在，当载荷移动后(卸载)，已破碎的岩屑呈条状向上翘起，有的条状翘起岩屑长度可达到 18～20mm，如图 4－12 所示。在实验过程中也可观察到，金刚石破碎岩石时，其刃前所产生的岩粉量不多，而大量的岩粉则产生在金刚石出刃的后侧。这是研磨破碎所特有的现象。

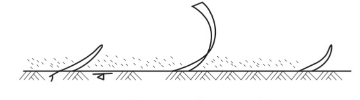


**图 4－12　单粒金刚石破碎灰岩的条状岩屑**

2. 金刚石破岩机理

国内外对金刚石钻头破岩机理存在着不同的观点，如研磨、磨削、刮削、剪切、切削、压皱、压入、压碎等。由于金刚石破碎岩石的作用比较复杂，目前主要有 3 种理论分析。

(1)“磨削”理论。对于孕镶钻头，目前普遍认为其钻进破岩的过程同砂轮的磨削相似。可把钻头上每一个包孕的金刚石颗粒看作是一个小刃齿，钻头看作有无数个刃的刀具。当钻头研磨岩石时，棱角比较锋利的磨料接触岩石表面后，因受钻头水平力的影

响，有一个压力作用到紧靠磨料前面的岩石层上，使其受挤压并发生变形。磨料随钻头旋转而运动，加大了对岩层的挤压和变形，当磨料的作用力超过岩石颗粒之间的联结力时，一部分岩石就与岩体分离而成岩屑。由此可知，岩屑是被推压下来的，习惯上将这种破碎过程称作“磨削”。磨削破岩的特点是没有密实核(岩粉核)和跃进破碎过程，纯属表面破碎。

(2)“切削”理论。表镶钻头破碎软岩则主要靠剪切和切削作用，破碎岩石的过程与切削破岩相似，所不同的是金刚石的切削角多为负角。

(3)“压碎”理论。大多数学者认为表镶钻头钻进脆性岩石是一种压碎过程。其表现如下：岩石在金刚石压模(出刃部分)作用下，刚开始时产生的弹性变形如图 4 - 13(a)所示；当外力继续增大，则沿接触部位发生两组裂隙如图 4 - 13(b)所示；随着载荷增大，裂隙数目增多，其中有几组裂隙向深部发展并交汇形成密实核如图 4 - 13(c)所示的(圆锥形 $aOb$)；载荷继续增大，密实核对岩石产生楔压，迅速产生图中 $AOB$ 剪切体，岩块崩离，最终完成破碎过程，如图 4 - 13(d)所示。如果将引起压裂变形的金刚石沿岩石表面移动(受水平力的作用)，则在金刚石出刃后的岩石将留下一条被压裂的沟。将这些被交错裂纹所破碎的岩石除去之后，便得到一条三角形的槽子。

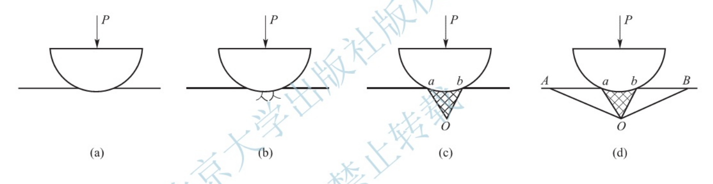





**图 4 - 13　压碎和压裂变形模型**

## 小知识

激光是一种单色性和方向性极好、亮度极高、相干性极强的受激辐射光源。可以通过聚焦而获得高密度能量(106～8J/cm²)，瞬间可以使任何固体材料熔化，甚至蒸发。因此，从理论上说，可以用激光来加工或破坏各种固体材料。

2006 年，中国矿业大学宋宏伟教授课题组对激光破岩技术在隧道开挖中的应用提出了初步设想。朱锋盼等对激光破岩技术在隧道开挖中的应用提出了以下观点。

(1) 目前所采用的激光技术主要是小的光束，用于代替掘进机刀具在理论上尚可，但如何用激光进行隧道这种相对较大断面的开挖，还有待进一步研究。

(2) 激光破岩时，高激光束在穿透岩心时，岩心表面肯定有不同程度的高温灼伤存在，改变岩石原有的物性参数，这将如何影响隧道围岩的稳定性。

(3) 激光掘进机在地下使用高温破岩，使得岩石温度增高，也将带来环境高温，如何对工作面采取有力的措施进行降温有待研究。

(4) 与传统方法比较，激光方法有很大不同，如何采取有效地掘进机破岩方案有待进一步研究。

(5) 激光开挖的工程适应性条件、经济性和安全性也需要进一步研究。

# 4.5 常用凿岩机具

## 4.5.1 凿岩机及其分类

凿岩机种类繁多，根据工程需要，合理地选择凿岩机是一项重要工作。一般应根据凿岩机的推进方式、动力供应、钻眼深度、钻眼直径和爆破要求等诸多因素综合考虑来选择凿岩机，其中凿岩机的类型、各种凿岩机的特点、及适用范围详见表 4－12。

表 4－12 凿岩机分类

| 类别 | 风动凿岩机 | 电动凿岩机 | 液压凿岩机 | 内燃凿岩机 | 潜孔凿岩机（潜孔钻机） |
|---|---|---|---|---|---|
| 动力源 | 压缩空气 | 电动机 | 高压液体 | 汽油机 | 压缩空气 |
| 类型 | 手持式<br>气腿式<br>向上式<br>导轨式 | 手持式<br>支腿式<br>导轨式 | 支腿式<br>轻型导轨式<br>重型导轨式 | 手持式 | 导轨式 |
| 特点 | 结构简单，适应性强，应用广泛；制造容易，成本低，维修使用方便；总效率低，需要压气设备；有排气污染；噪声大 | 总效率高，可达 60%～70%，动力消耗少，为同级风动凿岩机的 $\frac{1}{10}$；动力单一，配套简单，噪声和振动小。回转式适应性较差、用于 $f\leqslant 10$ 的岩石。有瓦斯煤尘爆炸的矿井，配用隔爆电动机 | 凿岩速度快，为同级风动凿岩机的 2～3 倍；总效率较高，可达 40% 以上。动力消耗少，为同级风动凿岩机的 $\frac{1}{4}\sim\frac{1}{3}$；动力单一，无需压气设备；噪声较小；无排气污染。但结构复杂，成本高，对维修使用的要求高 | 重量轻，携带方便，适用于新井开工准备阶段，流动性工程和山地无风、水、电的地区作业。不隔爆，有油烟污染，不适于煤矿井下使用 | 结构复杂，体积大，多用于露天；井下使用的潜孔凿岩机可钻凿大直径，中、深炮眼。适于钻凿探水、探矿孔等 |



## 4.5.2 风动凿岩机

风动凿岩机是目前我国凿岩机具使用量最大的一种凿岩机械，种类繁多，可供选择范围广，适用于各类岩石的钻孔要求。一般手持式和气腿式凿岩机机构简单、维修方便、重量轻，扭矩较大、凿岩效率高；控制系统集中，操作方便；采用风水联动湿式凿岩，支撑气腿可快速缩回。适用于矿山井巷掘进、铁路、水利等石方工程，因此，在动力输送方便的地方是钻眼机械的首选。

1．风动凿岩机分类(表 4－13)

**表 4－13 风动凿岩机的类型**

| 分类 | | | 主要型号 | 基本特点 | 适用钻眼范围 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 方向 | 直径/mm | 深度/m | 岩性 |
| 按安设与推进方式分 | 手持式 | | 改进01～03 | 重量轻，28kg，手持操作，可打各种方向的较小直径、较浅深度炮眼，主要用于钻凿下向炮眼 | 任意 | 35～42 | ＜4 | 软、中、硬 |
| | 气腿式 | | YT23<br>YT24<br>YT26 | 重量轻，24～26kg，主机安设在气腿上，靠气腿推力钻进；可钻凿水平或倾斜的炮眼 | 水平倾斜 | 34～42 | ＜5 | 软、中、硬 |
| | 向上式（伸缩式） | | YSP45 | 重量一般在40kg左右，气腿与主机在同一纵向轴线上联成一体。用于天井、巷道掘进等钻凿向上炮眼或锚杆眼 | 与水平成60～90° | 35～42 | ＜5 | 软、中、硬 |
| | 导轨式 | | YG35<br>YG42<br>YGZ70 | 重量一般在35～90kg，安装在供凿岩机往复运动的滑动轨道上，轨道架设在柱架或钻车上，可打水平和各种方向的较深炮眼 | 任意 | 40～55 | 5～15 | 硬、坚硬 |
| | 潜孔式 | | KQJ100 | 机重大于300kg，用于大深孔钻孔作业；机械化程度高，操作方便，钻孔效率高 | 任意 | 100，130 | ＜60 | 硬、坚硬 |
| 按配气装置特点分 | 有阀 | 滑阀式 | YT23 | 配气阀的换向依靠被活塞压缩了的废气膨胀功，耗气量小，易于加工 | 水平倾斜 | 34～42 | ＜5 | 软、中硬 |
| | | 控制阀式 | YT24<br>YT26 | 配气阀的换向依靠进入凿岩机的压缩空气，启动灵活，气缸装有排气消音罩，降低了噪声 | 水平倾斜 | 34～43 | ＜5 | 软、中硬 |
| | 无阀式 | | YTP26 | 无单独的配气装置，充分利用废气的膨胀功；凿速快，扭矩大，耗气量小，结构简单，维修方便 | 水平倾斜 | 36～45 | ＜5 | 中硬、坚硬 |
| 按活塞冲击频率分 | 低频 | | YT24 | 小于2000min$^{-1}$，噪声低，振动小，工作稳定 | 水平倾斜 | 34～42 | ＜5 | 中硬 |
| | 中频 | | YT23 | 2000～2500 min$^{-1}$，结构简单，适应性强 | 水平倾斜 | 34～42 | ＜5 | 软、中硬 |
| | 高频 | | YTP26 | 2500～4000min$^{-1}$，凿速快，振动较大，最好与台车配用 | 水平倾斜 | 36～45 | ＜5 | 中硬、坚硬 |
| | 超高频 | | 英B－8 | 4000min$^{-1}$以上，凿速快，振动大，主要零件磨损快，因此对材质要求高，多用于液压导轨式凿岩机 | 水平倾斜 | ＞50 | — | 坚硬 |

（续）

| 分类 | | 主要型号 | 基本特点 | 适用钻眼范围 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 方向 | 直径/mm | 深度/m | 岩性 |
| 按回转机构分 | 外回转式 | YGZ70<br>YGZ90 | 采用冲击与回转各自独立结构，齿轮式风动机驱动，两级正齿轮减速，冲击、转钎可分别调节，适应各种不同岩性钻眼 | 任意 | 38～80 | <30 | 软、中、硬 |
| | 内回转式 | YTP26<br>YT23 | 利用活塞回程与棘轮止逆机构的作用，迫使活塞沿螺旋槽回转一个角度，带动转动套转动，形成转钎运动，转钎速度不可调 | 任意 | 34～45 | <5 | 软、中、硬 |
| 按重量分 | 轻型 | 01-30<br>YT26 | 小于28kg，重量轻，使用方便，多用于手持式、气腿式人工操作的凿岩机 | 任意 | 34～42 | <5 | 软、中、硬 |
| | 中型 | YG35<br>YG42 | 30～50kg，多用于导轨式，冲击功大，扭转大，宜用于钻中深孔 | 任意 | 40～55 | 5～15 | 中硬、坚硬 |
| | 重型 | YGZ70<br>YGZ90 | 大于50kg，用于台车或凿岩台架，冲击有力，扭矩大，多为外回转，深孔钻眼优点易发挥 | 任意 | 38～80 | <30 | 中硬、坚硬 |



2. 风动凿岩机构造

风动凿岩机的类型很多，但主机构造则大致相同。现以YT—23型或7655气腿式凿岩机为例，介绍风动凿岩的构造。YT—23型气腿式凿岩机的主机由柄体、缸体和机头3部分组成，然后用两根螺栓将它们固装在一起，如图4-14所示。

(1) 在柄体上，有把手、水针、操纵阀、水阀、换向阀、调压阀、进风管、水管接头和气腿快速退回扳机等零部件。

(2) 缸体由缸体外壳、棘轮、螺旋杆、阀柜、阀、阀套、活塞导向套、消音罩等零部件组成。

(3) 机头由钎卡、转动套、钎套和机头外壳组成。

3. 风动凿岩机工作原理

凿岩机冲击钻眼时，钻眼工具不断受到冲击作用，但每冲击一次后，钻头需转动一定角度，使钻刃移至新位置上，再进行下一次冲击。破碎下的岩石应及时清除掉。因此，风动凿岩机内设有冲击机构、旋转机构和排粉系统，来完成上述3项任务。此外凿岩机还附有润滑系统和控制凿岩机工作的操纵系统。

1) 冲击机构组成

冲击机构由气缸、活塞和配气系统组成。借助配气系统，可以自动变换压气进入汽缸的方向，使活塞完成往复运动。配气系统有下列3种类型。

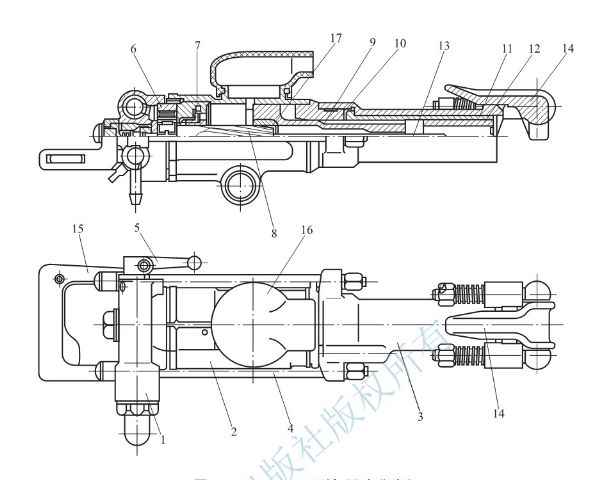



**图 4－14　YT—23 型气腿式凿岩机**

1—柄体；2—缸体；3—机头；4—螺栓；5—操纵阀；6—棘轮；7—配气阀；8—螺旋棒；9—活塞；10—导向套；11—转动套；12—钎套；13—水针；14—钎卡；15—把手；16—消音罩；17—螺旋母



（1）装有被动阀配气装置的配气系统。配气装置由阀柜、阀套和阀组成，其中阀的移动(改变阀的位置)依靠活塞压缩气缸内的余气来完成。根据阀的形状及其运动方式不同，这类配气装置又分为滑阀式(如 TY—23、YSP—45 型凿岩机)、蝶翻式(如 YT—25、ZF—1 型凿岩机)等多种类型。

（2）装有控制阀配气装置的配气系统。配气装置也由阀柜、阀套和阀组成，其中阀为筒状滑阀，(或碗状阀)阀的移动靠进入凿岩机内的压气来完成。YT—24 型和导轨式凿岩机采用这种配气装置。

（3）无阀配气系统。没有专门的配气装置，而靠特殊形式的活塞，在其尾端作成配气圆杆(起着阀的作用)自行配气。高频凿岩机一般采用这种类型的配气系统(如 YTP—26、YGZ—90 型凿岩机等)。

2）滑阀式被动阀配气装置和冲击机构的工作原理

现以 YT—23 或 7655 型凿岩机为例，说明被动阀配气装置和冲击机构的工作原理，如图 4－15 和图 4－16 所示。

（1）冲程运动。当操纵阀转至凿岩机运转位置时，压气从操纵阀孔道 1 经柄体和气室 2、轮孔道 3、阀柜孔道 4、环形气室 5 和阀套孔 6，进入缸体后腔，推动活塞前进，开始冲击行程。当活塞前端面 A 越过排气口后，缸体前腔内的余气受活塞压缩，形成气垫，前腔压力逐渐增高。压缩余气经回程孔道进入进入配气阀后部气室 7，使配气阀后端面上

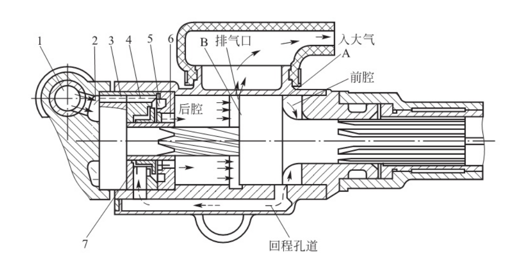



**图 4-15 被动阀冲击机构的活塞冲程运动**

1—操纵阀孔道；2—气室；3—轮孔道；4—阀柜孔道；5—环形气室；6—阀套孔；7—气室

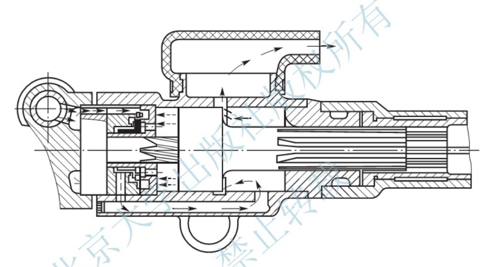




**图 4-16 被动阀冲击机构的活塞回程运动**

的压力逐渐增高。当活塞后端面 B 越过排气口后，气缸后腔与大气相通，压力逸出，压力骤然下降。这时，作用在配气阀后端面上的力大于作用在前端面上的力，从而推阀前移，使它与阀套盖靠合，切断通向缸体后腔的气路。同时，活塞冲击钎尾，结束冲程，开始回程。

（2）回程运动。当配气阀前移并与阀套盖靠合后，压气经阀外缘与阀柜之间的间隙、气室 7 和回程孔道，进入缸体前腔，推动活塞返回，开始回程运动。当活塞后端面 B 越过排气口时，缸体后腔内的余气受活塞压缩，形成气垫，压力逐渐增高，相应地使作用在配气阀前端面上的压力也逐渐增高。当活塞前端面 A 越过排气口后，缸体前腔与外界大气相通，压气逸出，压力骤然下降。这时，作用在配气阀前端面上的力大于后端面上的力，从而推阀后移，使它与阀柜靠合。切断通往缸体前腔的气路，结束回程运动，并开始新的冲程。

3）蝶翻式被动阀配气装置和冲击机构的工作原理

图 4-17 为装有蝶翻式被动阀配气装置的冲击机构，其工作原理与滑阀基本相同。

4）控制阀配气装置和冲击机构的工作原理

图 4-18 为装有控制阀配气装置的冲击机构，其工作原理如下。

（1）冲程运动。进入操纵阀的压气，通过气路进入气缸后腔，推动活塞向前运动。当

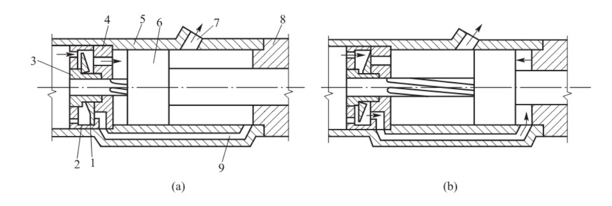



**图 4-17 蝶翻式被动阀冲击机构**

1—阀；2—阀柜；3—阀套；4—阀盖；5—气缸；6—活塞；7—排气口；8—导向套；9—回程气道

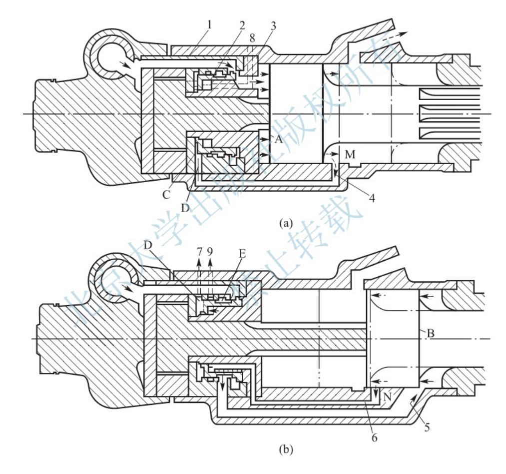



**图 4-18 控制阀冲击机构的工作原理**

1—阀柜；2—阀；3—阀套；4—使阀前移的控制气道；5—回程气道；
6—使阀后移的控制气道；7、8、9—通大气小孔

活塞后端面 A 越过控制气道 4 在缸体内的孔口 M 时，一部分压气经该孔道到达阀的背面空间 C，对阀施加压力，推阀前移，切断通往缸体后腔气路。阀向前移动时，空间 D 内的气体可经孔 8 排至大气。当活塞后端面越过排气口时，后腔与大气相通，这时，活塞靠惯性继续前进，打击钎尾，结束冲程运动。

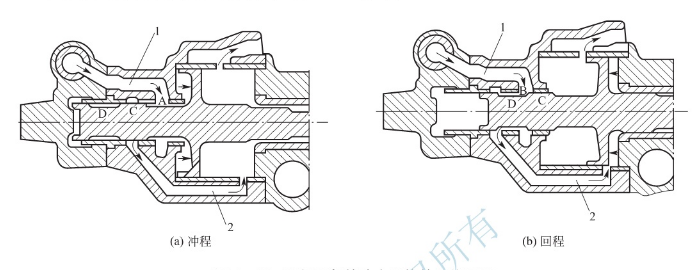
(2) 回程运动。阀前移后，压气从回程气道 5 进入气缸前腔，推动活塞返回。当活塞前端面 B 越过控制气道 6 在缸体内的孔口 N 时，一部分压气经该孔道进入阀的前面空间 D，推阀后移(阀后移时，空间 C 和 E 内的气体分别由孔 7、9 排至大气)，停止向气缸前




腔供气。待活塞前端面越过排气口、使气缸前腔与大气相通，在活塞不再后退时，回程结束，又开始新的冲程。

5）无阀配气冲击机构的工作原理

无阀配气冲击机构的工作原理如图 4－19 所示。




(a) 冲程　　(b) 回程

**图 4－19　无阀配气的冲击机构的工作原理**

1—进气气路；2—回程气道

（1）冲程运动。压气进入操纵阀，通过进气气路 1 到达气缸后腔，推动活塞向前运动。当活塞的配气圆杆柱面 C 通过进气口右侧面 A 时，切断了向气缸后腔的供气。这时，依靠已进入气缸后腔的压气膨胀、推动活塞继续加速前进。当活塞通过排气口时，气缸后腔排气，活塞靠惯性向前运动，直至冲击钎尾。

（2）回程运动。活塞冲击钎尾时，其配气圆杆的中间槽 D 将进气气路 1 与回程气道 2 沟通，使压气沿回程气道进入气缸前腔，推动活塞返回。当活塞的配气圆杆柱面 C 通过进气口左侧面 B 时，切断向气缸前腔的供气。这时，依靠已进入气缸前腔的压气膨胀，推动活塞继续返回。当活塞通过排气口时，气缸前腔排气，活塞靠惯性继续返回。同时，活塞的配气圆杆柱面又重新打开向气缸后腔供气的气路，抵消活塞回程动能，直至活塞达到回程终点，而后开始新的冲程。



6）旋转机构组成及工作原理

大多数凿岩机都是采用棘轮机构并利用活塞的运动来转动钎子的。棘轮机构有两种形式：内棘轮（棘齿在环形棘轮里面）和有独立螺旋棒的旋转机构；外棘轮（棘齿在环形棘轮外面）和螺旋槽刻在活塞柄上的旋转机构。国产凿岩机一般采用前一种旋转机构。高频凿岩机多采用后一种旋转机构。

内棘轮旋转机构见图 4－20 所示。棘轮 1 用键固定在柄体或缸体内。螺旋棒 3 的大头端位于棘轮内，其上有凹槽，槽内嵌有棘爪 2，借助弹簧或压气将棘爪顶在棘轮齿槽内。螺旋棒上的螺旋槽与固定在活塞头内螺旋母啮合。活塞柄 4 上的花键与转动套 5 内的花键配合。转动套前端压固有钎套 6。六角形断面的钎子 7 插在钎套内。

活塞冲程时，螺旋棒回转。活塞回程时，引导螺旋棒被棘爪卡住，迫使活塞回转，从而带动转动套、钎套和钎子转动。因此，活塞每往复一次，钎子就转动一个角度，而且，转钎是在活塞回程运动时完成的。但国外也有一些凿岩机的转钎是在活塞冲程时完成的。

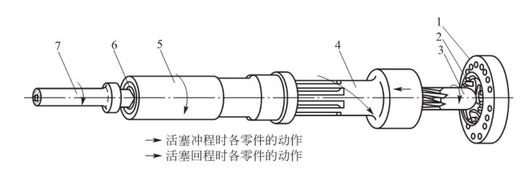



**图 4-20　内棘轮和螺旋棒的旋转机构**

1—棘轮；2—棘爪；3—螺旋棒；4—活塞柄；5—转动套筒；6—钎套筒；7—钎子

外棘轮旋转机构如图 4-21 所示。活塞柄 2 上刻有螺旋槽 3 和花键 6。活塞螺旋槽与棘轮内圆上的螺旋凸块咬合，活塞花键与转动套 7 内的花键配合。钎套压固在转动套内，或采用牙嵌的方式在轴线方向上与转动套啮合在一起。棘轮爪嵌在机头内的凹槽中，并借助弹簧和小顶拄将它顶在棘轮齿槽内。活塞冲程时棘轮旋转。活塞回程时，棘轮被棘爪卡住，迫使活塞回转，从而带动转动套、钎套和钎子转动。

以上两种旋转机构统称为内旋转机构。此外，还有外旋转机构，即由独立的风动马达，经减速后直接带动钎子旋转，它与冲击机构不发生联系。其优点是：扭矩大，不易夹钎；转数可调，可适应不同岩石；可以反转，便于接长和拆卸用螺扣连接的长钎杆。这种旋转机构一般用于大功率的深孔凿岩机(如 YGZ—90 型凿岩机)等。

4. 风动凿岩机其他辅助系统

1）凿岩机的操控系统

凿岩机的操作和控制主要通过在柄体部位的把手、操纵阀、调压阀、换向阀的扳动进行操控。操作是先将把手开关打开，使压缩空气进入凿岩机的操控系统，通过扳动操纵阀、调压阀即可使凿岩机进行工作，通过扳动换向阀可以使气腿伸长或缩短，如图 4-22 所示。



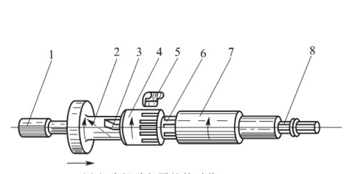



**图 4-21　外棘轮和活塞螺旋槽旋转机构**

1—配气圆杆；2—活塞；3—活塞螺旋槽；4—棘轮；5—棘轮爪；6—活塞花键；7—转动套；8—钎子

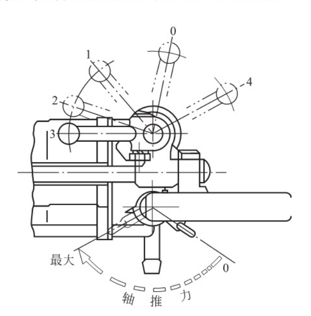



**图 4-22　操纵阀和调压阀的操纵部位**

0—停止工作，停风，停水；1—轻运转，注水，吹洗；2—中运转，注水，吹洗；3—全运转，注水，吹洗；4—停止工作，停风，强力冲洗

2）排粉系统

在钻眼过程中，必须及时排除眼底的岩粉，才能顺利钻进并提高钻速。此外，细粉尘尤其是含 $SiO_2$ 的粉尘，对工人健康十分有害，长期吸入，会引起尘肺病和硅肺病。《煤矿安全规程》规定：在开凿井筒或掘进岩巷、半煤岩巷道时，都必须采用湿式凿岩，不准打干眼。因此，国产凿岩机都装备有轴向供水系统。现代凿岩机都采用气、水联动的注水机构。YT—23 或 7655 型凿岩机的气、水联动注水机构如图 4－23 所示。

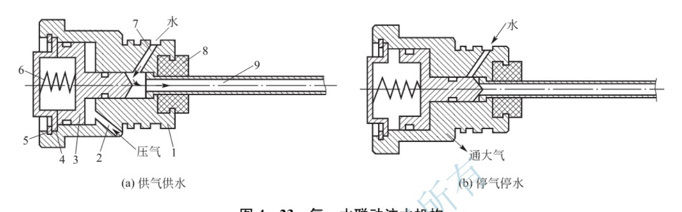



**图 4－23　气、水联动注水机构**

1—柄体端大螺母；2—气道；3—注水阀；4—弹簧压盖；5—挡圈；6—弹簧；7—水道；8—密封垫；9—水针

(1) 气、水联动注水机构工作原理。凿岩机开动时，压气由柄体气室经柄体端大螺母 1 上的气道 2 到达注水阀 3 的前端面，克服弹簧 6 的阻力，推阀后移，开启水路。水经水针 9 进入钎子中心孔，再由钎头出来注入眼底。水与岩粉形成的浆液经钎杆和炮眼壁之间的间隙排出。

凿岩机停止运转时，柄体气室压气消失，弹簧推动注水阀关闭水路，自动停止注水。

(2) 水压。水压应比压气压力低一个大气压左右，否则，水会渗入凿岩机内，洗掉润滑油，使零件生锈。钻眼所需平均耗水量 $Q$ 可按式(4－34)确定

$$Q=10^{-6}aFv \tag{4-34}$$

式中，$a$——水与钻出岩粉的比例系数，$a=20$；

$F$——炮眼断面，$mm^2$；

$v$——钻速，mm/min。

(3) 水量。水量影响钻速和润湿效果，既不能过大，也不能过小。为提高钻速和改善润湿效果，水内可加入少量表面活性剂例如环烷酸皂、12～14 烷基苯磺酸钠等，以降低水的表面张力。

3）强力吹扫炮眼的系统

除供水系统外，大多数凿岩机还有用压气强力吹扫炮眼的系统，如图 4－24 所示。使用时将操纵把手扳至强吹位置，凿岩机便停止运转。这时，压气经过气道 2 和气孔 3，进入钎子中心孔，再通过钎子送往眼底，吹出岩粉。

4）侧旁供水系统

轴向供水系统的缺点是：水易进入凿岩机内冲洗掉润滑油；部分泄漏通向凿岩机机头的压气会进入钎尾中心孔，使水内充有气泡，这样会降低润湿岩粉的效果；因水压和水针断面所限，不可能增大水量。

为克服上述缺点，对大功率、钻速高的凿岩机或具有独立回转机构的凿岩机，一般采

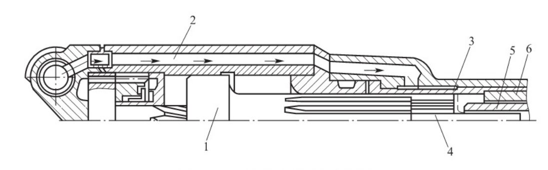



图 4-24 强力吹扫炮眼的系统

1—活塞；2—强吹气道；3—转动套筒气孔；4—水针；5—钎尾；6—钎套筒

用侧旁供水系统。在该系统中，钎尾上套有给水接头(套接头部分的钎尾断面为圆形)，堵住钎尾端中心孔，水不经凿岩机，直接由钎尾侧面进水孔进入钎子，如图 4-25 所示。

5）润滑系统

凿岩机运转时，为提高其效率，减少机件磨损、发热，防止锈蚀延长机械寿命，必须有良好的润滑系统。

除旧凿岩机(如 01～30 型)本身带有油室和润滑道外，新型凿岩机均采用独立的自动注油器。注油器有两种类型：悬挂式和落地式。前者容量较小，直接悬挂于凿岩机进风弯管上。后者容量较大，放在地面，用软管与凿岩机进风弯管连接。

悬挂式自动注油器如图 4-26 所示。当压气通过注油器时，有少量压气经油阀上的进气孔 1 进入油室 2，给油面施加压力。润滑油则经输油管 4、油阀调节针的间隙和出油孔 3 流出，雾化后同压气一起进入凿岩机。



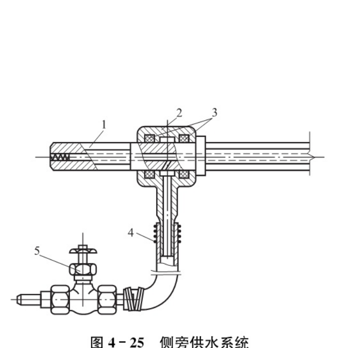



图 4-25 侧旁供水系统

1—钎尾；2—给水接头；

3—密封圈；4—软管；5—水截门

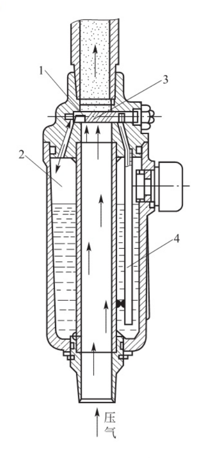



图 4-26 悬挂式自动注油器

1—进气孔；2—油室；

3—出油孔；4—输油管

落地式自动注油器如图 4-27 所示。其工作原理与悬挂式基本相同。

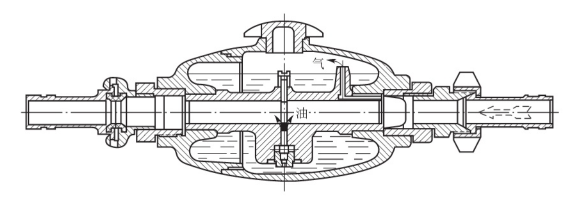



**图 4-27　落地式自动注油器**

凿岩机用润滑油的粘度要根据凿岩机类型和工作环境温度来选择。一般情况下，油的运动粘度以 50℃时 21～66($m^2/s$)较好。最常采用的润滑油有 20 号、30 号机油，22 号、32 号透平油。为适应凿岩机的工作条件(零件的工作速度高、温度高、间隙小、易沾水、润滑油易被水冲刷等)，可选择添加剂来改进润滑油的性能。添加剂的品种很多，须根据所采用的基础油来选择。试验表明，基础油为 30 号机油时，添加 0.5%的二树丁基对甲酚和 3%～5%的烷基磷酸咪唑啉，可以提高凿岩速度，减少机体震动。减少油雾，防止零件锈蚀和过度磨损，并能降低耗油量。添加剂应先在加热至 90℃左右的适量机油内搅拌，待完全溶解和混合均匀后，再加入其余部分机油搅拌，并冷却至常温。

6) 推进机构和安装设备

凿岩机的推进装置用以产生轴推力，安装设备用以支持凿岩机的重量。凿岩机主要采用的气腿装置则兼有上述两种作用。现代的气腿式凿岩机，其主机与气腿已成为一个整体，便于统一集中操作，如图 4-28 所示。



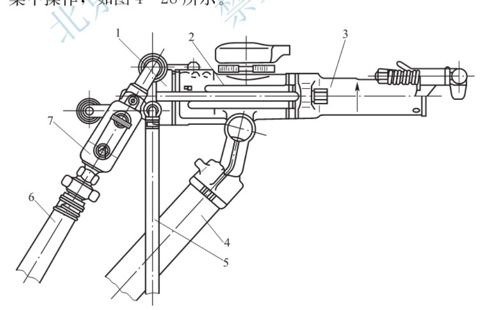



**图 4-28　气腿凿岩机整体图**

1—柄体(操纵机构)；2—气缸(冲击、转钎机构)；3—机头；
4—气腿(推进机构)；5—水管；6—气管；7—注油器(润滑机构)

(1) 气腿的组成。气腿由缸体、活塞和活塞杆组成，按凿岩机与气腿连接方式，分为缸体移动式和活塞移动式气腿；按动作原理，分为单向动作和双向动作气腿。单向动作的

气腿只利用压气使气腿伸长，缩回时要用手拉；双向动作的气腿，伸长和缩回都利用压气。国产凿岩机气腿的技术特征见表 4-14。

表 4-14 国产凿岩机气腿的技术特征

| 型号 | 72-12 | FT140 | FT140 | FT140A | FT140B | FTJ140 | FT160 | FT170 | FT190 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 重量/kg | 12 | <14 | 15 | 12 | 12 | 17.5 | <15 | 17.5 | 11 |
| 支承最大高度/mm | 2200 | 3035 | 3035 | 2225 | 2930 | 2500 | 2050 | 2980 | 1620 |
| 支承最小高度/mm | 900 | 1680 | 1680 | 1275 | 1680 | 1200 | 1250 | 1700 | 920 |
| 推进长度/mm | 1300 | 1355 | 1355 | 950 | — | — | 800 | — | 700 |
| 最大轴推力/N | 900 | 1400 | 1400 | 1400 | — | — | 1400 | — | 1900 |
| 制造厂家 | — | 沈阳市工矿塑料配件厂 | 天水燎原风动工具厂 | 天水燎原风动工具厂 | — | — | 沈阳市工矿塑料配件厂 | — | 沈阳市工矿塑料配件厂 |
| 备注 | — | 与 YT25 配套，玻璃钢外管 | 与 YT30 配套，铝合金外管 | 同左 | — | — | 与 YT26 配套，玻璃钢外管 | — | 与 YSP45 配套，玻璃钢外管 |



7655 或 YT—23 型凿岩机所使用的 FT—160 型气腿为缸体移动双向动作气腿，如图 4-29 所示。

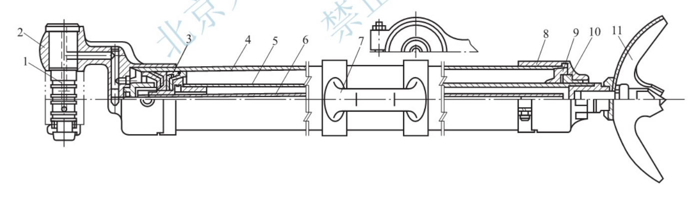



图 4-29 FT—160 型气腿

1—横臂；2—架体；3—胶碗；4—外管；5—内管；6—气管；7—提把；
8—下管座；9—导向套；10—防尘套；11—顶叉

(2) 气腿伸长。气腿伸长时，如图 4-30(a)所示。由进气孔 2 进来的压气，先将换气阀 1 推向左侧，然后经气道 5 进入气腿缸体上腔，而下腔通过孔 7、气管 10 和换向阀与大气相通。这时气腿伸长。

(3) 气腿收缩。需要气腿缩回时，如图 4-30(b)所示。扳动手把扳机，推换向阀右移，这时压气经气道 4、气管 10 和孔 7 进入缸体下腔，而上腔则经气道 5 和换向阀与大气相通。

(4) 气腿力的调节。气腿力可用调压阀来控制。调压阀套在换向阀上，用小手把来转

动，如图 4－30(c)所示。气腿正常工作时，压气经孔 1、进气偏心槽 2、孔道 A 进入气腿上腔。此外，有一个泄漏偏心槽 3(断面图上虚线所示)，其方向与进气偏心槽相反，通过排气口可泄露一部分压气。转动调压阀时，可调节进气和泄气偏心槽的断面，来调整进气量和排气量，从而达到控制气腿力的目的。图中，由孔 5 输出的压气用来推压密封胶圈 6，使它紧贴外壁，以达到密封的目的。



(a) 气腿伸长　(b) 气腿快速缩回

(c) 调压阀

**图 4－30　FT—160 型气腿动作原理**

a，b：1—换气阀；2—进气孔道；3—换气阀体；4、5—横臂气道；6—气腿上腔；
7—内管气孔；8—气腿下腔；9—内管与气管间气腔；10—气管；
c：1—气孔；2—进气偏心槽；3—排气偏心槽；4—中心空腔；5—压气腔；6—密封胶圈

小知识

深部破岩方法——水介质主导破岩

在深部岩石破碎施工中，鉴于深部岩石特点，水介质破岩方法在深井环境中有着独特的优势，已经成为深部岩石破碎的重要方法。其优势主要有以下几个。

(1) 固有的高压水头。在千米深井工作面，自然水头压力可达数十兆帕，充分利用这种水力能量，再借助适当的增压设备，则可实现足以破岩的水压，这方面已有不少油气行业研究者进行了相关研究，并取得了突破性的进展。

(2) 天然的降温剂。通过工作面水介质的循环，可带走高温原岩所释放出来的大量热量，对降低工作面温度有着积极的作用。

(3) 柔性撞击、减小扰动。用水介质破岩如水射流方法破岩，岩石在液滴的冲蚀作用下产生裂纹，出现颗粒剥离。同时水体的楔入胀裂更进一步促进了微裂纹的萌生、扩展，加速了破岩效率。

## 4.5.3 其他动力凿岩机

1. 液压凿岩机

1）液压凿岩机类型及技术特征

从20世纪60年代初起，国内外开始发展以液压为动力的新型凿岩机。这种凿岩机具有钻眼快、效率高、动力小、零件寿命长、振动和噪声小、不产生油雾等许多优点，是凿岩机发展的方向。

国产液压凿岩机和国外液压凿岩机的类型及技术特征，见表4-15。图4-31为国产YYG—150型导轨式液压凿岩机和YYG—120型导轨式液压凿岩机。



表4-15 液压凿岩机类型和技术特征

| 技术特征 | 单位 | 中国 | | | 法国 | | | 美国 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 型号 | — | YYG—80 | YYG—90 | TYYG—20 | RPH—200 | RPH—400 | H—70 | JH—2 | HPR—1 |
| 机重 | kg | 84 | 89 | 90 | 135 | 180 | 123 | 154 | 147 |
| 外形尺寸(长×宽×高) | mm | 790×253×205 | 880×225×262 | 916×250×310 | 600×200×135 | 822×302×180 | — | — | — |
| 冲击功 | J | 120～150 | 250～330 | >200 | 100～200 | 200～360 | 230～310 | 80～120 | 170～280 |
| 冲击次数 | $min^{-1}$ | 3000 | 1900～2200 | 2850～3000 | 2000～4000 | 1800～3300 | 2600～2800 | 12000 | 2500～4000 |
| 扭力矩 | Nm | 15 | >14 | >20 | 30 | 70 | 50 | 22.5 | 41 |
| 转速 | r/min | 0～300 | 0～230 | 0～200 | 0～250 | 0～300 | 160或240 | 450 | 0～280 |
| 凿孔直径 | mm | 40 | 43～65 | 50～65 | 32～41 | 43～152 | — | — | 38～64 |
| 回转用油量 | l/min | 36 | 38 | 58 | 40 | 0～170 | 55 | — | — |

（续）

| 技术特征 | 单位 | 中国 | | | 法国 | | | 美国 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 冲击用油量 | l/min | 96 | 125 | 90 | 40 | 60～90 | 110 | — | 95 |
| 油压 | MPa | 12 | 12 | 5～10 | 20 | 20 | 10 或 13 | — | 21 |
| 功率 | kW | 36.5 | 38.5 | 40 | 25 | 45 | 29.4 | 55.2 | 50 |
| 成产厂 | — | 株洲矿山工具厂 | 湘潭风动机械厂 | 北京钢铁学院云锡公司 | 塞克马公司 | 蒙塔贝特 | 乔埃 | 加德纳-丹佛 | — |


(a) YYG150型导轨式液压凿岩机

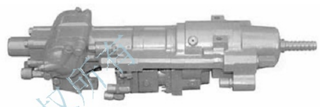

(b) YYG120型导轨式液压凿岩机

**图 4-31　YYG—150 型导轨式液压凿岩机和 YYG—120 型导轨式液压凿岩机**



2）液压凿岩机的结构

液压凿岩机一般由冲击机构、转钎机构、推进机构、排粉机构和操纵机构等组成，如图 4-32 所示。

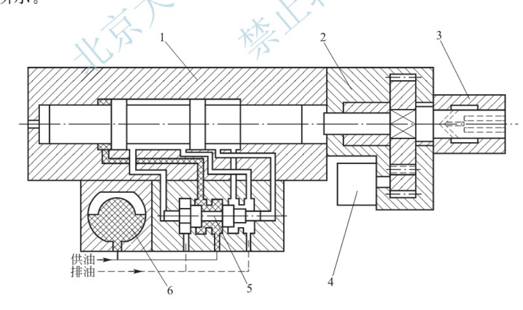



**图 4-32　液压凿岩机的组成**

1—冲击机构；2—转钎机构；3—供水排粉机构；4—液压马达；5—配油阀；6—蓄能器

（1）冲击机构。主要包括活塞、缸体和配油机构，工作原理与风动凿岩机相似：即通过配油机构，使高压油交替作用于活塞两端，并形成压差，迫使活塞在缸体内作往复运动，完成冲击钎子和破碎岩石的目的。活塞的冲击功可通过改变供油压力或活塞冲程进行调节。配油机构分有阀式和无阀式两类，常见的配油机构为柱状阀式。

（2）转钎机构。转钎机构大多为外回转，很少采用内回转。外回转由液压马达驱动，经一级或二级齿轮减速后带动钎子回转。液压马达的输出扭矩可以通过改变油泵流量来实现，扭矩调节范围较大。

（3）推进机构。液压凿岩机多为高频重型导轨式凿岩设备，要和凿岩台车配套使用，利用台车的导轨和推进器实现推进。

（4）排粉机构。可用压气、水或气水混合物排粉，常用压力高、流量大的冲洗水。供水方式有中心供水和旁侧供水两种。中心供水时活塞中空；旁侧供水时，钎尾有径向水孔，其排粉原理与风动凿岩机湿式降尘相同。

（5）操纵机构。由液压系统实现机器的操纵，系统包括冲击回路、推进回路和转钎回路。回路中设有蓄能器、调速阀、减压阀和手动换向阀。冲击回路的蓄能器可缓和液压冲击，吸收和补偿由于活塞往复变速运动产生的流量脉动。转钎回路的调速阀调节液压马达的转速和扭矩。推进回路的减压阀用以调节凿岩机的轴推力，液压凿岩机液压系统如图 4－33 所示。

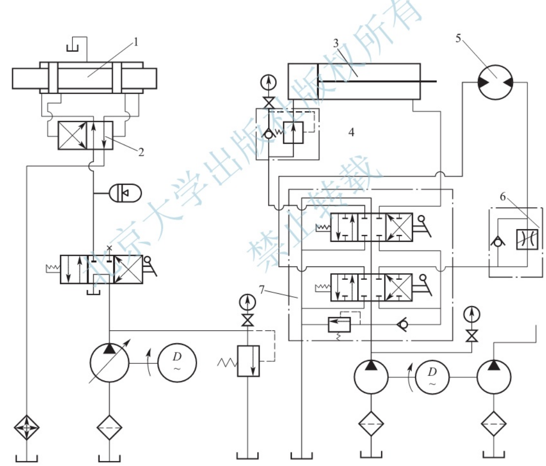




**图 4－33 液压凿岩机液压系统**

1—冲击活塞；2—配油阀；3—推进油缸；4—减压阀；5—转钎液压马达；6—调速阀；7—多路换向阀

3）液压凿岩机的动作原理

液压凿岩机的结构形式很多，其主要区别在于冲击机构的配油方式；旋转机构则大多采用液压马达经齿轮减速带动钎子回转。

按冲击机构配油方式，液压凿岩机分为前后腔交替进回油式、前腔常进油式和后腔常进油式 3 种，其中又分为有阀和无阀两种。阀的结构有套筒阀、滑阀和柱状阀 3 种。

（1）YYG—90 型液压凿岩机工作原理。国产 YYG—90 型液压凿岩机的冲击机构属

前后腔交替进回油式，采用滑阀。其凿岩机结构及其液压系统如图 4－34 所示。其动作原理如下。

(a) 凿岩机结构

(b) 凿岩机的液压系统



**图 4－34　YYG—90 型液压凿岩机和液压系统**

Ⅰ—机头部；Ⅱ—回转部；Ⅲ—缸体部

1—蓄能器壳体；2—蓄能器活塞；3—缸体；4—液压室活塞；5—齿轮；6—冲击杆；7—钎卡弹簧；8—钎卡；9—机头；10—齿轮；11—摆线转子内齿轮液压马达；12—换向阀阀芯；13—花键套筒

① 冲击机构。缸体部为凿岩机的冲击机构。缸体 3 内有两个平行的镗孔，分别装有活塞 4 和配油阀芯 12。装活塞的镗孔称作油腔(相当于风动凿岩机的气缸)。配油阀(二位四通阀)的作用类似于风动凿岩机的配气装置，可自动改变油液流入油腔的方向，使活塞作往复运动。

② 活塞的冲程运动。自油泵站供来的液压油经缸体进油口进入配油阀镗孔 P 腔，配油阀芯处于使 P 腔与 A 腔连通、B 腔与 $O_2$ 腔连通的位置。这时，压力油经 A 腔和缸体上虚线油道 a 进入缸体后腔 A′；缸体前腔 B′内的油，则经缸体上虚线油道 b、配油阀镗孔内的 B 腔和 $O_2$ 腔，流回油箱，因此，使活塞向前冲击。同时蓄能器处于能量释放状态，其壳体 1 内的活塞 2 将向前移动，释放出能量可帮助推动缸体内活塞向前冲击作用。当活塞运动到后部大头的后端面打开推阀孔 $K_1'$时，后腔内一部分高压油经缸体上实线油道 C 进入配油阀镗孔 $K_1$ 腔，推阀前移($K_2$ 腔经缸体上实线油道 d、推阀孔 $K_2'$和回油腔 $O_4$ 连通)，

使 A 腔与 P 腔隔开，而与回油腔 $O_1$ 连通，并使 B 腔与 $O_2$ 腔隔开，而与 P 腔连通，从而前腔开始进油，后腔开始回油。同时活塞打击冲击杆 6 尾部的端面，经冲击杆将冲击能量传给钎子。至此，活塞冲程结束并开始回程。

③ 活塞的回程运动。活塞回程运动时，蓄能器内的油起初回至油箱，待活塞运动至关闭回油口 $O_3$ 后，油开始被压缩，迫使蓄能器壳体内活塞后移，并储存能量。当缸体内活塞运动到前部大头的前端面打开推阀孔 $K_2'$ 时，前腔内一部分高压油经缸体上实线油道 d 进入配油阀镗孔 $K_2$ 腔，推阀后移（$K_1$ 腔通过油道 c、推阀孔 $K_1'$ 与回油腔 $O_4$ 连通），使配油阀恢复至活塞冲程开始时的位置。这时，回程结束并开始下一个循环的冲程。

④ 回转机构。由一台摆线转子内齿轮油马达 11 驱动齿轮 10，经一级减速使齿轮 5 转动。齿轮 5 的中心孔与花键套筒 13 紧配合，花键套筒与冲击杆上的花键轴配合，钎尾插入冲击杆前端的六方孔内，因此，当齿轮 5 转动时，花键套筒、冲击杆和钎杆都将跟着一起转动。

在液压系统中（图 4－34(b)），安设有两台齿轮油泵分别供冲击机构和回转机构工作，工作压力为 14MPa，用两个手动三位四通换向阀分别操纵这两个机构。

为了缓和冲击机构的换向阀换向时产生的液压冲击，进油口 P 处设有一个蓄能器。油马达回路中装有单向节流阀，可调节回转机构液压马达的转数。

(2) 液压凿岩机前腔常进油和套筒阀冲击机构的工作原理。在这种液压凿岩机的冲击机构中，前腔保持常进油状态（即始终保持高压油状态）只是控制后腔的进回油，并配合前、后腔有效作用面积的差值，来实现活塞的往复运动，如图 4－35 所示。

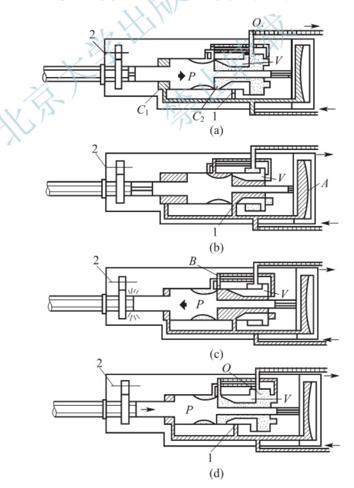





**图 4－35　前腔常进油和套筒阀式冲击机构的工作原理**

1—进油口；2—齿轮；

$A$—蓄能器；$B$—油道；$C_1$—前腔；$C_2$—后腔；$O$—出油口；$P$—活塞；$V$—套筒阀

当活塞P与套筒阀处于图4－35(a)位置时，后腔$C_2$通过出油口O与低压回油管相通，使活塞向后运动(回程)，套筒阀也跟着向后移动。当套筒阀关闭出油口O、打开进油口1时，高压油进入后腔(图4－35(a)、(b)、(c))。这时，由于活塞后端的有效作用面积大于前端，活塞向前运动，并冲击钎尾(冲程)。在活塞冲程过程中，蓄能器A处于能量释放状态(即蓄能器也向后腔供油)，可帮助推动活塞向前冲击作用。冲程结束后，活塞将油道B打开，高压油通过油道B推套筒阀向前移动，关闭进油口1，打开出油口O，放出后腔$C_2$内的油，使活塞返回(图4－35(d))。在活塞回程过程中，蓄油器进油储存能量。

后腔常进油冲击机构的工作原理，基本上与前腔常进油类似，区别在于保持后腔常进油状态，而只控制前腔的进回油。

液压凿岩机和电动凿岩机，由于其结构上的特点，无法采用中心供水，只能采用侧向供水清除岩粉。但如果改变蓄能器的位置，液压凿岩机也能够采用中心供水方式。

2. 电动凿岩机

1) 电动凿岩机类型和技术特征

风动凿岩机在使用过程中，需将电能转换为压气能，这不仅需要装备功率较大的压气机(包括附属设备)和敷设管路，而且能量转换和传送效率较低，这就限制了风动凿岩机的发展及其凿岩能力的提高。此外，工作时振动大、排气噪声高和油雾造成的可见度差，也是风动凿岩机难以克服的缺点。从20世纪60年代初起，为了取代风动凿岩机，国内外除研制和应用了液压凿岩机，同时还研制和试用了电动凿岩机。电动凿岩机类型和技术特征见表4－16。



**表4－16　电动凿岩机类型和技术特征**

| 技术特征 | 单位 | 型号 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | YD—2 | YD—25(东风—25) | YD—31(东风—31) | YDT30(YD—30) |
| 机重 | kg | 30 | 25 | 31 | 30 |
| 凿眼直径 | mm | 34～43 | 40 | 40 | 35～38 |
| 凿眼深度 | m | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 适用岩石 | f | 8～10 | 6～10 | 6～10 | 8～12 |
| 冲击功 | J | ＞4 | 45 | 45 | ≥45 |
| 冲击次数 | $min^{-1}$ | 2800 | 2000～2100 | 2000～2100 | 2000～2100 |
| 扭力矩 | Nm | ＞10 | 10 | 10 | ≥18 |
| 凿岩速度 | mm/min | — | 180($f$=8～10) | 180 | 150($f$=8～12) |
| 钎杆转速 | r/min | — | 230～270 | 230～270 | ≥150 |
| 电动机功率 | kW | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 频率 | f | 50 | 200 | 50 | 50 |
| 电压 | V | 127 | 220 | 380 | 380 |
| 转速 | r/min | 2640 | 1140 | 2840 | 2840 |

（续）

| 技术特征 | 单位 | 型号 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | YD—2 | YD—25（东风—25） | YD—31（东风—31） | YDT30（YD—30） |
| 隔爆性能 | — | 隔爆，水冷式 | 不隔爆，水冷 | 不隔爆，水冷 | 不隔爆，水冷 |
| 钎杆规格 | mm | B22 或 B25 | B22 | B22 | B22 |
| 水管内径 | mm | 13 | 13 | 13 | 13 |
| 冲洗钻孔用水压 | MPa | 0.2～0.3 | 0.2～0.3 | 0.2～0.3 | 0.3～0.5 |
| 外形尺寸（长×宽×高） | mm | 570×320×225 | 600×245×200 | 700×270×200 | 683×260×170 |
| 支腿 | — | 水腿式 ST-140 | 气腿式 | 气腿式 | 气腿式 |
| 最大长度 | mm | 2880 | 2350 | 2350 | 2350 |
| 最小长度 | mm | 1680 | 1400 | 1400 | 1400 |
| 最大推动力 | N | 1400 | — | — | — |
| 附属设备 | — | 工农 36 型三缸活塞泵，电缆控制箱，六芯矿用隔爆插销 | 4kW200f 发电机组，0.3m³ 空气压缩机 | SDK—380/2～3 漏电控制箱，0.2m³ 回转式空气压缩机 | DSA—380/3 型电动凿岩机控制箱 FTJ12 型手摇支腿 |
| 制造厂 | — | 无锡煤矿电动凿岩机厂 | 浙江龙游探矿厂 | 浙江龙游探矿厂 | 江西宜春风动工具厂 |



2）电动凿岩机结构

电动凿岩机的结构形式有偏心块式、活塞压气式、凸轮弹簧式、离心锤式等。这些凿岩机都以电能为动力，此外，还有以电磁能为动力的电磁式凿岩机。目前使用的只有偏心块式和活塞压气式两种。

国产 YD—2 型电动机凿岩机属偏心块式，其构造如图 4-36 所示。电动机为矿用隔爆水冷式，可用于煤矿井下。

3）电动凿岩机的工作原理

（1）偏心块式电动凿岩机。其基本工作原理如图 4-37 所示。电动机带动滑槽 1 旋转，滑槽带动滚轮 2，再通过小轴 3 带动主偏心块 4 和偏心块 5，绕活塞锤 7 的动轴 6 转动。偏心块转动时产生离心力 $F$，其分力 $F_x$ 作用在活塞锤上，使它在缸套内作直线往复运动，而滚轮则在滑槽内滚动。

活塞锤向下运动时，靠偏心块的离心力和活塞锤的惯性力产生动能打击钎子；往上运动时，产生的动能压缩气室内的空气使之转变为压气能。当活塞再次向下运动时，压气能再转变成为膨胀功，用来加强活塞锤的冲击力。

当发生卡钎事故，使活塞锤停止往复运动时，偏心块仍能绕动轴旋转，从而起到自动保护电动机的作用。电动凿岩机一般采用外棘轮旋转机构转动钎子。

（2）活塞压气式电动凿岩机。其工作原理如图 4-38 所示。电动机 2 旋转时，经减速

**图 4－36　YD—2 型电动机凿岩机**

1—钎头；2—钎杆；3—钎卡；4—钎尾套；5—机头外壳；6—棘轮；7—螺旋套；8—导向套；9—衬套；10—冲锤；11—偏心轮；12—观察盖；13—主偏心块；14—滚针；15—机壳；16—缸套；17—活塞环；18—气缸盖；19—手柄；20—进线盒；21—电动机；22—进水嘴

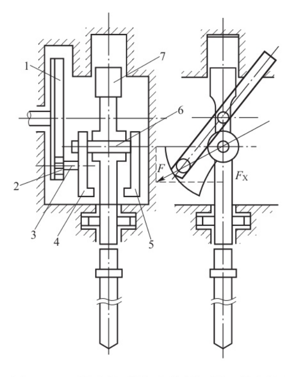



图 4-37 偏心块式电动凿岩机的工作原理

1—滑槽；2—滚轮；3—小轴；4—主偏心块；5—偏心块；6—动轴；7—活塞锤

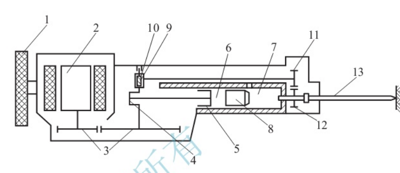



图 4-38 YD—30 型电动凿岩机工作原理示意图

1—手把；2—电动机；3—减速齿轮；4—曲柄连杆；5—活塞；6—后气室；7—前气室；8—冲锤；9—蜗杆；10—蜗轮；11—齿轮；12—转杆齿轮；13—钎子

齿轮 3 带动曲柄连杆 4，使活塞 5 作往复运动。活塞向前运动时，压缩冲锤后气室 6 内的空气使其压力增大，而冲锤前气室 7 与外部大气相通，从而推动冲锤 8 向前运动并获得动能。冲锤越过排气口后靠惯性继续向前运动，压缩前气室内的空气形成缓冲气垫，同时冲击钎尾。碰撞后，冲锤弹回并超过排气口，同时活塞也开始向后运动，在后气室内造成真空，使冲锤在前、后气室压差作用下，返回原位置。

### 3. 内燃凿岩机

1）内燃凿岩机类型和技术特征

内燃凿岩机是由小型汽油发动机、压气机、凿岩机组合而成的一种手持式凿岩机械。内燃凿岩机外壳用轻铝合金铸造，重量轻、携带方便，因此适用于新矿井开工准备及山区无电源、无空压机设备的地区和流动性较大的临时工程。作业时，由本身产生的压缩空气吹洗炮眼里的岩粉，可钻凿垂直向下或水平方向的岩石炮眼。垂直向下钻孔深度可达 6m。该机可在−40℃～+40℃气候条件下工作。因不隔爆、有污染，不允许在煤矿井下使用。内燃凿岩机类型和技术特征见表 4-17。

表 4-17 内燃凿岩机类型技术特征

| 技术特征 | 单位 | YN30A | YN23 |
| --- | --- | --- | --- |
| 机器重量 | kg | 28(镁合金壳体) | 23 |
| 轮廓尺寸(长×宽×高) | mm | 760×330×205 | 650×380×250 |
| 发动机型号 | — | 单缸风冷二冲程 | 单缸风冷二冲程 |
| 化油器形式 | — | 无浮子式 | 薄膜无浮子式 |


（续）

| 技术特征 | | 单位 | YN30A | YN23 |
|---|---|---|---|---|
| 发动机 | 活塞直径 | mm | 58 | 60 |
| | 活塞行程 | mm | 70 | 60 |
| | 活塞排量 | $cm^3$ | 180 | 170 |
| | 负荷转速 | r/min | 2700～3000 | 3000 |
| | 怠速 | r/min | ≤2200 | ≤2200 |
| 冲击次数 | | $min^{-1}$ | 2700～3000 | 3000 |
| 冲击功 | | J | ≥35 | >35 |
| 扭力矩 | | Nm | ≥18 | 16 |
| 钎杆转速 | | r/min | ≥150 | ≈120 |
| 钎杆尺寸 | 钎杆尾部 | mm | B22×108 | B22×108 |
| | 冲杆尾部 | mm | B25×108 | — |
| 钻孔速度(平均值) | | mm/min | ≥200 | ≥250 |
| 最大钻孔深度 | | m | 6 | 6 |
| 油箱容积 | | l | ≥1.65 | ≥1.8 |
| 耗油率 | | l/m | ≤0.15 | 0.18 |
| 汽油与润滑油混合比例 | | (按容积) | 12∶1 | 16∶1 |
| 润滑油 | | — | 内燃式凿岩机油 | 10号车用机油 |
| 汽油 | | 号 | 60～70 | 75号以上 |
| 断电器白金间隙 | | mm | 0.4～0.5 | 0.3～0.5 |
| 火花塞间隙 | | mm | 0.5～0.7 | 0.4～0.6 |
| 生产厂 | | — | 洛阳、宜春、上海风动工具厂 | 沈阳、无锡探矿机械厂 |



2）内燃凿岩机的构造

如图4-39所示，主要包括以下几个部分。

（1）发动机为单缸二冲程、回流扫气曲轴箱增压型汽油机、发动机的气缸、活塞、曲轴、连杆以及油箱、汽化器、起动器、磁电机、风扇等全部组成一体装在机器后部护罩内。

（2）发动机采用拉绳回缩机构启动，无浮子式汽化器。

（3）发动机气缸的延伸部分即是凿岩机气缸，凿岩机冲程活塞由3段圆柱体组成：靠机头一端为小圆柱，其上的螺旋槽与棘轮装置配合可实现转钎动作；靠发动机一端的圆柱段与发动机活塞直径相同，是直接承受燃烧室爆炸压力的部分；中间一段大圆柱体将气缸分隔为前后两腔，前腔经斜气道通燃烧室，其目的利用燃烧排气压力实现活塞回

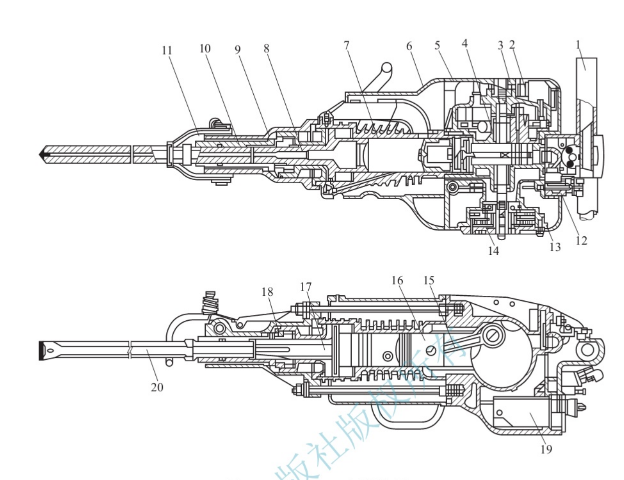



**图 4-39 YN30A 内燃凿岩机**

1—把手；2—飞轮；3—风扇罩；4—磁电机装置；5—曲轴箱；6—护罩；7—气缸；8—冲击筒套；9—机头；10—转动筒套；11—钎卡；12—柄体；13—油箱；14—起动装置；15—曲轴连杆；16—发动机活塞；17—冲击活塞；18—活塞导承；19—空气滤清器；20—钎子



程，后腔即为压气机压缩室，通过压缩室吸气阀和排气阀的作用，实现活塞回程和排除岩粉。

(4) 发动机气缸采用风冷，润滑由化油器送入的汽油与机油雾化混合液完成。

(5) 凿岩机气缸润滑采用燃烧后的残余机油。

3) 内燃凿岩机的主要部件和作用原理

(1) 发动机。发动机是内燃凿岩机的动力装置，由发动机活塞、曲轴箱、燃烧室、化油器，气道系统等组成。发动机一般采用二冲程，曲轴箱增压小型汽油机。利用汽油机燃烧室可燃气体(汽油与空气混合物)的爆炸压力，推动发达机活塞和凿岩机冲击活塞作反方向运动，曲轴不输出功率。发动机活塞冲程时，将可燃气体从曲轴箱压入燃烧室，并给曲轴箱飞轮储能；发动机活塞回程时，曲轴箱出现负压，可燃气从化油器吸入曲轴箱，从而维持发动机活塞连续工作。为适应凿岩机任意方向作业的需要，发动机配合结构简单，工作可靠的无浮子式化油器。燃烧室采用磁电机点火系统。

(2) 凿岩机。凿岩机由冲击机构、转钎机构、排粉机构和气道系统组成。冲击机构的活塞冲程靠公共燃烧室内可燃气的爆炸压力，回程则利用废气压力。转钎机构有内回转和外回转两种，内回转为冲击活塞螺旋副棘轮机构；外回转由发动机曲轴输出回转扭矩驱动转钎机构。排粉机构采用冲击活塞回程和排气吹岩粉方式，也有曲轴箱驱动的副气缸排气吹岩粉方式。内燃凿岩机的组成和作用原理如图 4-40 所示。

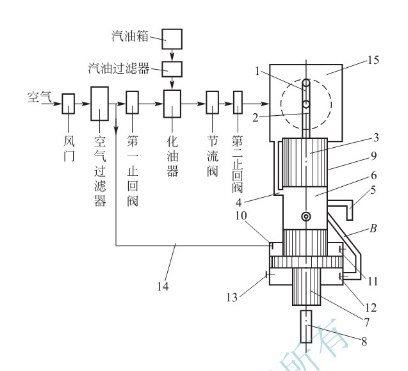



**图 4-40 内燃凿岩机的组成及工作原理**

1—曲轴；2—连杆；3—发动机活塞；4—可燃气进气孔；5—废气排气管；6—公共燃烧室；7—冲击活塞；8—钎杆；9—气缸；10—进风阀；11—压气排气阀；12—燃气进气阀；13—燃气排气阀；14—进风软管；15—曲轴箱



## 4.5.4 煤电钻和岩石电钻

与冲击式凿岩机比较，煤电钻和岩石电钻具有以下优点：利用电能作动力，不需要任何转换，能量利用效率高，设备简单，费用低；用切削方式破岩，钻出的岩粉粒度大，钻进效率和钻速较高，并能连续钻进；噪音低、无油烟、震动小。

1. 煤电钻

1）煤电钻的类型和技术特征

煤电钻是煤矿最常用的钻眼机械，煤电钻设备简单，价格低廉，重量、扭矩和功率较小，电机轴转数较高，动力单一，能量利用效率高，携带和移动方便，操作简单，适于在煤层和 $f \leqslant 4-6$ 的岩石中钻眼。在煤层和 $f<3$ 的岩石中钻眼时，可以手持推进。国内常用的煤电钻的类型和技术特征，见表 4-18。

**表 4-18 煤电钻的类型和技术特征**

| 技术特征 | 单位 | 型号 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $MZ_2$—12 | $MZ_2$—12A | $MZ_2$—12B | SD—12 | MSZ—12 | MZ—12 | MZ—12A | MZ—12C | SD—12—380 |
| 重量 | kg | 15.3 | 15.5 | 15.5 | 18 | 13 | 15.5 | 15.5 | 15.5 | 18 |
| 功率 | kW | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 电机效率 | % | 79.5 | — | — | 75 | 74 | 76 | 76 | 76 | 70 |

（续）

| 技术特征 | 单位 | 型号 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $MZ_2$—12 | $MZ_2$—12A | $MZ_2$—12B | SD—12 | MSZ—12 | MZ—12 | MZ—12A | MZ—12C | SD—12—380 |
| 额定电压 | V | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 380 |
| 额定电流 | A | 9 | 9 | 9 | 9.1 | 9.5 | 9 | 9 | 9 | 2.65 |
| 相数 | — | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 电机转速 | r/min | 2850 | 2820 | 2820 | 2750 | 2800 | 2820 | 2820 | 2820 | 2800 |
| 电钻转速 | r/min | 640 | 470 | 550 | 610/430 | 630 | 640 | 520 | 640 | 610 |
| 电钻扭矩 | J | 17.6 | 24.9 | 21.2 | 18/26 | 18.5 | 17 | 21.1 | 17 | 14.4 |
| 外形尺寸长 | mm | 366 | 366 | 366 | 425 | 310 | 340 | 340 | 340 | 412 |
| 宽 | mm | 318 | 318 | 318 | 330 | 300 | 318 | 318 | 318 | 322 |
| 高 | mm | 218 | 218 | 218 | 265 | 200 | 220 | 220 | 220 | 260 |
| 钻孔直径 | mm | 38～45 | 38～45 | 38～46 | 38～47 | 38～48 | 38～49 | 38～50 | 38～51 | 38～52 |
| 钻杆尾端直径 | mm | $\phi$19 | — | — | $\phi$19 | $\phi$19 | $\phi$19 | — | — | $\phi$19 |
| 隔爆性能 | — | 隔爆 | — | — | 隔爆 | 隔爆 | 隔爆 | 隔爆 | 隔爆 | 不隔爆 |
| 制造厂 | — | 抚顺矿灯厂 | 抚顺矿灯厂 | 抚顺矿灯厂 | 上海电动工具厂 | 上海电动工具厂 | 天津煤矿专用设备厂 | 天津煤矿专用设备厂 | 温顺煤矿设备厂 | 成都红光电机厂 |
| 型号含义 | M—煤；Z—钻；D—电钻；12—额定功率1.2kW | | | | | | | | | |



2）煤电钻的结构

煤电钻主要由电动机、减速器、散热风扇、开关和手柄等部分组成。

（1）电动机采用三相交流鼠笼式全封闭感应电动机，电压为127V，功率为0.9～1.6kW(一般为1.2kW)。电机轴前端与减速箱相连，散热风扇装在机轴后端，与电动机同步运转。

（2）减速器一般由二级外啮合圆柱齿轮构成。黄油润滑，有单速和多速两种。

（3）外壳用铝合金铸造，并要求密封防爆、易散热。手柄须用橡胶绝缘，以防触电。手柄上设有开关扳手。煤电钻的构造见图4-41，煤电钻的传动系统见图4-42。

3）煤电钻的维护与检修

（1）日常维护。每天在工作面安全地点维护，具体内容：检查各部螺丝，松动的要拧紧，缺少的要补上；检查开关是否灵活可靠；检查转动部分声音是否正常；检查风扇是否完整，有无刮碰现象；检修电缆，插销是否完好，并保证插销在使用中不得自由脱落。

（2）短期维护。每10天在井下或地面修理站维护，具体内容：检查减速器中润滑油及滚珠和齿轮磨损情况，不合要求的应予调整或更换；检查各处隔油密封圈是否完好，有无油浸线圈现象；检查转子轴承磨损是否超限，定子线圈是否完好；检查导电绝缘，测定绝缘电阻如低于0.5MΩ，应予干燥；检查各防爆零件是否有缺陷，煤电钻隔爆标准，见表4-19。

**图 4－41　$MZ_2$—12 型煤电钻**

1—电动机；2—开关；3—减速器；4—定子；
5—转子；6—外壳；7—中间盖；8—风扇；9—风扇罩



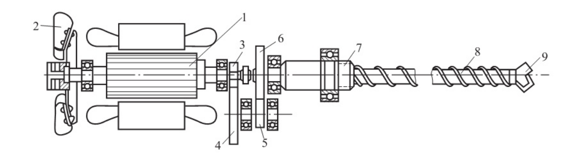



**图 4－42　煤电钻的传动系统**

1—电动机；2—风扇；3、4、5、6—减速器齿轮；7—电钻心轴；8—钻杆；9—钻头

表 4－19 $MZ_2$—12 型煤电钻接合面的隔爆标准

| 位置 | 直径接合间隙不大于/mm | 接合长度不小于/mm |
|---|---|---|
| 电动机轴与端盖的孔 | 0.6 | 25 |
| 端盖与外壳 | 0.4 | 12.5 |
| 开关盒盖与操作推开 | 0.4 | 25 |
| 接线盒外壳与开关盒盖 | 0.4 | 12.5 |
| 接线座与接线盒外壳 | 0.5 | 25 |
| 接线座与接线柱 | 0.4 | 12.5 |
| 接线座与接地线座 | 0.4 | 12.5 |
| 接线盒外壳与距离套 | 0.4 | 12.5 |
| 开关盒盖与外壳 | 接合面的任一点间隙不大于 0.2 | |

(3) 长期维护。每 3 个月在机修厂维护，具体内容：拆卸整个煤电钻，清洗油污，更换磨损超限零件；干燥定子线圈，或重新绕制已烧坏的线圈；检查转子铝条有无断裂；检修后进行电气、机械两部分的合格试验。

2. *岩石电钻*

1) 岩石电钻的类型和技术特征

岩石电钻的重量、扭矩、功率都比煤电钻大，但电机轴转数较低，要求施加较大轴压。岩石电钻可在中等坚固($f$=4～8)的岩石上钻眼。

岩石电钻主机结构与煤电钻基本相同，但需配有推进装置，以便对钻头施加较大轴压，因此，其重量较大，需采用支持主机和推进装置的支撑安装设备，或与台车、钻装车配套使用。岩石电钻的推进方式有链条推进、钢丝绳推进、螺杆推进、液压推进等多种。岩石电钻如图 4－43 所示，岩石电钻的类型和技术特征见表 4－20。

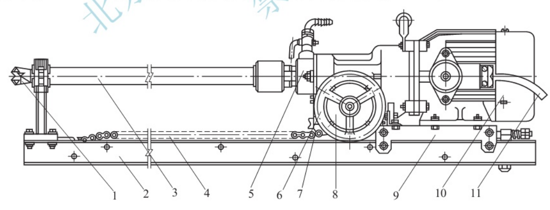



图 4－43 岩石电钻

1—钻头；2—导轨；3—钻杆；4—链条；5—供水装置；6—手轮；7—导向链轮；8—离合器；9—滑架；10—岩石电钻；11—电缆

表 4－20 岩石电钻的类型和技术特征

| 技术特征 | 单位 | 型号 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $EZ_2$—2.0 风冷 | $YZ_2$S 水冷式 | YDX—40A | YDX—40B |
| 功率 | kW | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 额定电压 | V | 127 或 380 | 380 | 127，220，380，660 | 127，220，380，660 |


（续）

| 技术特征 | 单位 | 型号 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $EZ_2$—2.0 风冷 | $YZ_2S$ 水冷式 | YDX—40A | YDX—40B |
| 额定电流 | A | 13 或 4.4 | 4.7 | 13.5，8，4.5，2.6 | 13.5，8，4.5，2.5 |
| 电动机频率 | Hz | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 电动机相数 | | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 电机转速 | r/min | 2790 | 2820 | 2790 | 2790 |
| 电钻转速 | 转/分 | 230 300 | 240 360 | 240 360 | 240 |
| 电钻效率 | % | 340 | 78 | | |
| 推进速度 | mm/min | 79 | 264 468 | 280 525 | 280 |
| 退钻速度 | mm/min | 368 470 | 7.2 10.8 | | |
| 最大推力 | N | 545 | 7000 | 7000 | 7000 |
| 钻孔深度 | m | | 1.8 | 5 | 5 |
| 供水方式 | | 7000 | 侧向 | 侧向 | 侧向 |
| 隔爆性能 | | 1.5～2 | 隔爆 | 隔爆 | 隔爆 |
| 推进方式 | | 侧向 | 链条 | 链条 | 钢丝绳 |
| 外形尺寸（长×宽×高） | mm | 隔爆链条 | 625×260×300 | 570×343×318.5 | 667×352×293 |
| 钻头直径 | mm | 650×320×320 | $\phi$38～42 | $\phi$34～45 | $\phi$35～45 |
| 重量 | kg | $\phi$36～45 | 40 | 35 | 40 |
| 生产厂 | — | 抚顺矿灯厂 | 天津煤矿专用设备厂 | 沈阳风动工具厂 | 沈阳风动工具厂 |
| 备注 | — | 配 YKB—380/2 型控制箱 | 配 YZKI 型控制箱，2DZC 型悬臂机械台车 | 与 DZ—1 型轨轮式单机钻架配套使用 | — |



2）岩石电钻的结构和工作原理

岩石电钻主要由电动机、减速器、推进器、排粉装置和传动系统等组成。

（1）电动机。各型岩石电钻均用三相交流鼠笼型隔爆自扇风冷式异步电动机驱动，功率 2kW。电动机前端通过中间盖与减速器连成一体，后端装有风扇和风扇罩，电动机的开停，由接线盒内的电位开关控制。使用岩石电钻时需配备电气控制箱。

（2）减速器。减速器由直齿轮、蜗杆蜗轮、摩擦离合器等组成，减速器的输出轴可分别实现电钻钻杆的旋转、电钻的推进和退出动作。电钻钻杆的旋转由电动机经二级直齿轮减速后驱动，其中一级齿轮可根据岩石硬度更换配对齿数。电钻的推进则经蜗轮、链轮、链条或滚筒、钢丝绳驱动。磨擦离合器由手轮操作，可实现电钻的推进和退出。

（3）推进器。由于旋转式钻眼破岩钎刃要依靠轴压力作用才能侵入岩石，因此岩石电钻均装设有推进机构。推进机构有链轮链条式和滚筒钢丝绳式两种，前一种方式可实现自动推进和快速自动退出；后一种方式仅能实现自动推进，而退出则靠人拉。推进器由滑架、导轨、扶钎器以及链轮链条或滚筒钢丝绳组成，当磨擦离合器合上时，固定电钻的滑

架在链轮(或滚筒)的驱动下，通过链轮链条的啮合(或滚筒上的钢丝绳缠绕)作用，沿导轨滑行，实现电钻的进退。推进器必须配用专用钻架，岩石电钻才能正常工作。

(4) 排粉装置。排粉装置采用侧式供水，湿式钻眼。

(5) 传动系统。国产链条推进的岩石电钻的传动系统如图 4-44 所示。主机安装在特制导轨上，电动机经齿轮、蜗杆蜗轮减速后，通过摩擦离合器带动链轮正转或反转。链轮与固定链条咬合，故链轮转动时，可使主机沿导轨前、后移动。

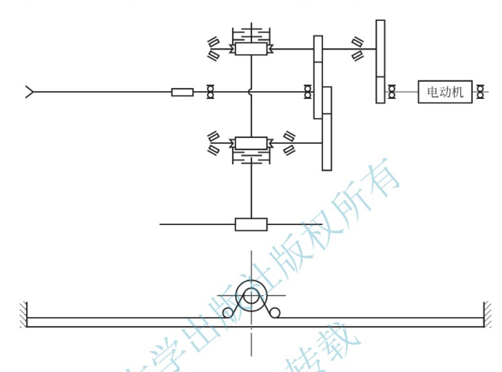





图 4-44 链条推进的岩石电钻的传动系统

3) 岩石电钻的使用

(1) 使用方法：钻孔工作必须在岩石电钻、电气控制箱、钻架及控水设备齐全的情况下，方能保证安使用；根据炮眼排列，确定钻架位置；将岩石电钻装在钻架推进架上，安装钻杆，将钻头顶紧在岩壁上。

(2) 注意事项：按要求接线，接线要牢靠；钻架要牢固，供水水路要畅通；应经常保持钻头锐利；出现钎杆卡住时，应松开离合器空转一下，再行推进；在推进进程结束前应松开离合器或停电，以免损坏机件。

发生下列情况之一者禁止使用：①漏电麻手；②钻架支柱顶板岩石脱落；③熔断器烧断；④减速器声音异常；⑤开关、插销、电气控制箱工作不可靠。

## 4.5.5 凿岩台车

1. 凿岩台车类型和技术特征

为提高钻眼机械化程度，与巷道掘进机械化作业线设备配套，以及随着重型高效能凿岩机的发展，从 20 世纪 60 年代初起，各国开始研制和使用各种类型的凿岩台车，凿岩台车类型见表 4-21。

表 4-21 凿岩台车类型

| 类型 | 特点 | 适用范围 |
|---|---|---|
| 掘进凿岩台车 | 双钻臂、三钻臂或多钻臂同时凿岩。轨轮、轮胎或履带行走机构。驱动动力为风动、液动或柴油机 | 岩石平巷、隧道涵洞和地下工程掘进时炮眼的钻凿作业 |
| 采矿台车 | 单钻臂或双钻臂同时凿岩。轮胎式行走机构。驱动动力主要为风动 | 金属矿山、井下开采矿场和大型硐室中、深炮眼的钻凿作业 |
| 锚杆台车 | 单钻臂凿岩。轨轮式、轮胎式行走机构。动力为风动、电动 | 钻凿巷道、硐室锚杆眼和安装锚杆作业 |

凿岩台车带有独立推进机构的推进器，可保证产生钻孔所需要的轴推力。凿岩机固定在滑架上，滑架沿推进器的导轨架移动。目前，最广泛采用的是钻臂式凿岩台车，即推进器借助钻臂支承在可自行的台车上。钻臂可上下、左右移动，以便将凿岩机安置在所需要打眼的位置上，如图 4-45 所示。

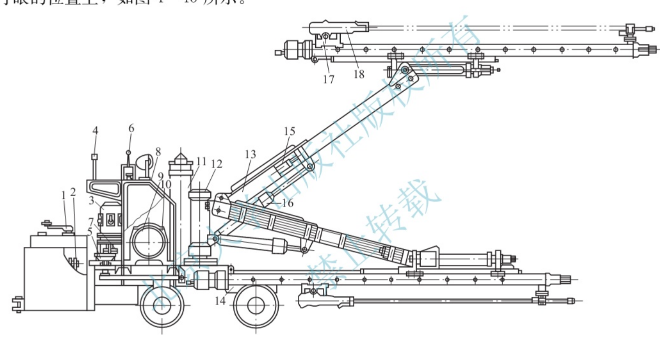



图 4-45 CGJ220—2 型掘进凿岩台车

1—行走控制器；2—电阻器；3—油泵风马达；4—多路换风阀；5—制动器；6—风阀；7—联轴器；8—操作台；9—电机；10—减速器；11—固定气缸；12—转柱油缸；13—钻臂；14—行走机构；15—俯仰角油缸；16—支撑油缸；17—推进器；18—凿岩机

2. 掘进凿岩台车的构造和原理

1）推进器

（1）推进机构。推进机构给凿岩机提供轴推力和支承力，并完成凿岩机驶向和退离岩壁的动作。推进机构的类型有风马达丝杠式、风马达链条式、油缸钢丝绳式和油缸链条式。驱动的动力有风动和液压两种，如图 4-46、图 4-47 和图 4-48 所示。

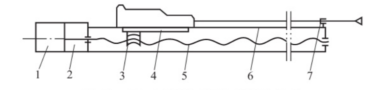



图 4-46 风马达丝杠式推进机构

1—风马达；2—形星齿轮减速器；3—推进螺母；4—托盘；5—丝杠；6—滑架；7—扶钎器

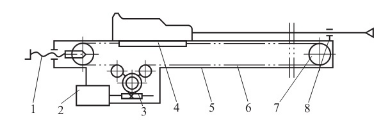



**图 4-47　风马达链条式推进机构**

1—链条张紧装置；2—风马达；3—蜗轮蜗杆减速器；
4—托盘；5—滑架；6—链条；7—导向链轮；8—扶钎器

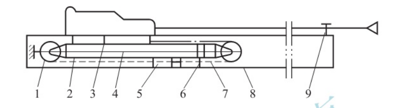
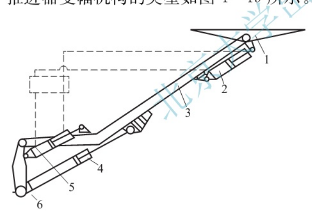



**图 4-48　油缸钢丝绳式推进机构**

1—导向滑轮；2—油缸；3—托盘；4—活塞杆；5—调节装置；
6—活塞；7—钢绳；8—滑架；9—扶钎器

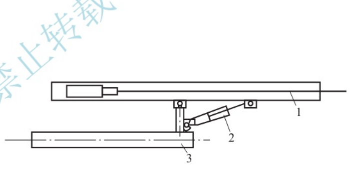


(2) 变幅机构。变幅机构用于改变推进器的方向和位置，并与钻臂变幅机构相配合使推进器实现平动、摆动、补偿和翻转等动作，以满足凿岩机调整炮眼方向和位置的要求。推进器变幅机构的类型如图 4-49 所示。



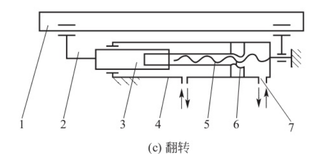

(a) 平动

1—推进器托盘；2—仰俯角油缸；3—钻臂；
4—钻臂油缸；5—平动油缸；6—钻臂座




(b) 摆动

1—推进器；2—摆角油缸；3—钻臂




(c) 翻转

1—推进器；2—转动卡座；3—连接筒；4—油缸体；5—螺旋棒轴；
6—转动体(螺旋母)；7—进油口

**图 4-49　推进器变幅机构的动作示意图**

2）钻臂

（1）摆式钻臂。摆动式钻臂由钻臂、转柱、钻臂油缸和摆臂油缸等组成，如图 4－50 所示。钻臂在升降油缸和摆臂油缸作用下，可在垂直和水平方向实现升降和摆动，即按直角坐标调位，摆式钻臂按照使用条件不同，还有几种变型，如推进器可翻转式，带回转式副钻臂的和钻臂可伸缩的摆式钻臂。前两种用于钻凿小角度的底眼，后一种用于推进器补偿油缸行程不够的情况。摆式钻臂结构简单、操作直观，可钻凿各种类型的掏槽眼，但钻臂操作程序较多。

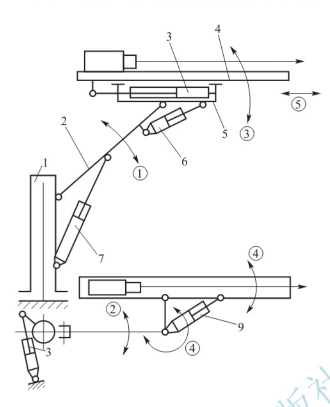



**图 4－50　摆式钻臂**

1—立柱(转柱)；2—钻臂；3—补偿油缸；4—推进器；5—托架；6—俯仰油缸；7—钻臂油缸；8—摆臂油缸；9—摆角油港；①—钻臂升降；②—钻臂摆动；③—推进器俯仰；④—推进器摆角（水平摆动）；⑤—推进器补偿

（2）回转式钻臂。回转式钻臂由回转支座、钻臂、钻臂升降油缸等组成，如图 4－51 所示。钻臂根部的回转机构可使整个支臂围绕回转支座的水平回转轴回转 360°，故炮眼的位置由回转半径和回转角度来确定，即钻臂按极坐标方式调位。回转机构的类型有油缸齿条式(图 4－52)、曲柄圆盘式(图 4－53)和液压马达蜗杆蜗轮式。回转式钻臂找眼操作的程序少，凿岩机贴帮、贴底性能好，但结构复杂，操作直观性差。目前掘进凿岩台车的钻臂多为此种形式。



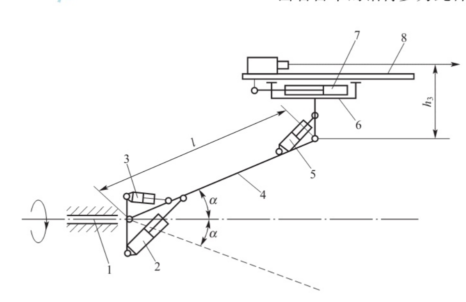



**图 4－51　回转式钻臂**

1—回转支柱；2—钻臂油缸；3—平动缸；4—钻臂；5—俯仰油缸；6—托架；7—补偿油缸；8—推进器

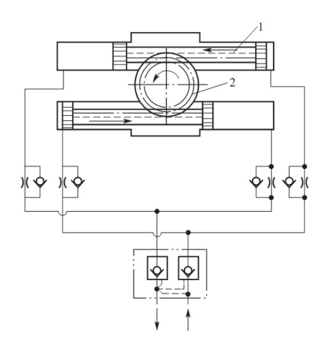



图 4-52 油缸齿条式回转钻臂的回转机构

1—齿条活塞油缸；2—回转座齿轮

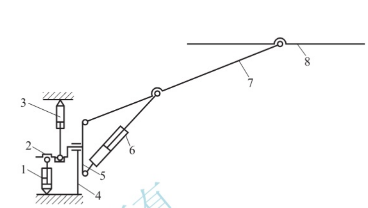



图 4-53 曲柄圆盘式回转钻臂的回转机构

1、3—油缸；2—曲柄连杆；4—支座；5—圆盘；6—钻臂油缸；7—钻臂；8—推进器



3）行走机构

（1）轨轮式。轨轮式由直流电机或液压马达驱动，结构简单、工作可靠、使用寿命长，适应软岩巷道；但调动不灵活，错车不方便，拐弯受巷道曲率半径限制，常用于煤矿。

（2）履带式。履带式由液压马达驱动，调动灵活、工作可靠、爬坡能力强，可用于倾角较小的巷道；结构复杂，履带易磨损，使用寿命较短，在软岩巷道中使用困难，在有轨巷道中使用，存在压轨问题。目前国外掘进凿岩台车多使用这种类型。

（3）轮胎式。轮胎式由液压马达驱动，调动灵活、工作可靠，不易压坏胶管和电缆；结构复杂，轮胎易磨损，使用寿命较短，多用于金属矿。

4）液压系统

（1）主回路。

① 单泵多液动机开式系统。台车的推进器、钻臂的变幅机构以及其他机构的液压回路均由一台油泵供油，油泵容量大，液压元件少，适于配用风动凿岩机的台车。

② 多泵多液动机开式系统。凿岩机、推进器、钻臂、行走部等各液压回路由几台油泵分开供油。每台油泵容量小，油泵台数多，能量利用合理。各机构间的动作干扰少，适用于全液压凿岩台车。目前的掘进凿岩台车大多采用这种系统。

（2）控制回路。

① 推进机构的调速回路用以调节推进器产生的轴推力和推进速度，可以使凿岩机在最优轴推力下工作。调速回路有 5 种类型，如图 4-54 所示，其中单向减压阀调节回路系统简单，应用最多，但和低压溢流阀、调速阀调节回路一样，系统存在能量损失较多。液压伺服变量泵调速回路比较合理，它在推进器推进时输出小流量，返回时输出大流量，能量损失较少，但变量泵结构复杂、成本较高。

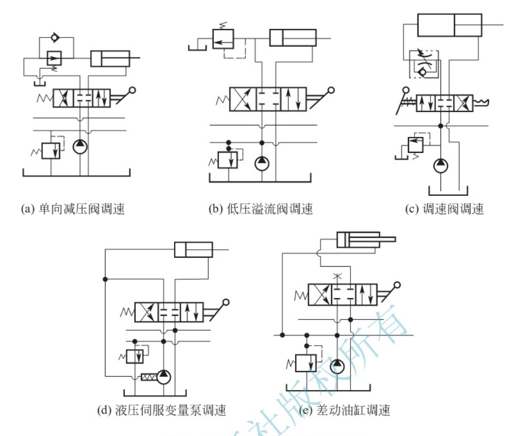



图 4-54　推进器液压调速回路

② 钻臂液压平动机构回路的作用是在钻臂变幅时，保持推进器平行移动，以使钻凿的炮眼间有较高的平行精度，可提高爆破效率，特别是掏槽眼的爆破效率，常见的两种液压平动机构控制回路如图 4-55 所示；在有误差的液压平动控制回路中，平动缸和俯仰缸的对应油腔油路互相连通，当钻臂升降时，两缸活塞一伸一缩，可以实现推进器基本保持平行。这种控制回路结构简单、动作可靠，构件尺寸小，其平动误差可以满足工程要求，应用较广，适用于摆式钻臂和回转式钻臂。在无误差的液压平动控制回路中，钻臂的升降油缸兼作平动油缸，钻臂升降油缸的活塞杆腔与俯仰缸的活塞腔油路连通，当钻臂升降时，两缸活塞同时伸缩，可以实现推进器理论上的平行移动。这种控制回路无平动误差，结构简单、动作可靠，但俯仰缸结构尺寸较大，适用于摆式钻臂。

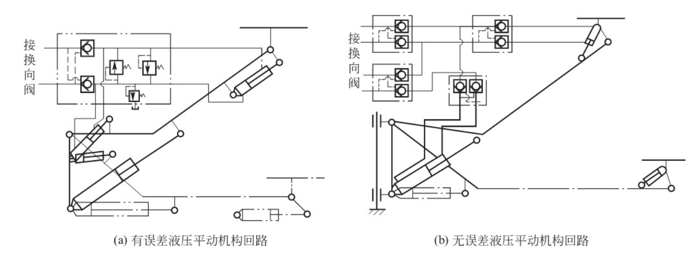



图 4-55　钻臂液压平动机构回路

## 本章小结

本章系统全面地介绍了岩石的爆破分级与凿岩机具的选择使用，从岩石的密度指标、孔隙性、水理性质、抗风化指标、抗冻性指标，以及岩石的强度特性等方面讲述了岩石的物理与力学性质；分别介绍了岩石的坚固性和可爆性分级的分级标准及等级的划分情况；介绍了爆破作业过程中的钻眼方法和破岩机理，阐述了冲击、切削、滚压和磨削4种常用的机械破岩方法及其破岩机理；从机械型号、结构构造、工作原理、使用方法等方面介绍了几种常用凿岩机具。

## 习题

**一、名词解释**

岩石的密度指标，孔隙率，孔隙比，含水率，自由膨胀率，侧向约束膨胀率，膨胀压力，单轴抗压强度，单轴抗拉强度，可爆性

**二、填空题**

1. 岩石的密度指标主要有________、________、________、________和________。
2. 通常描述岩石强度特性的指标有岩石的________、________、________和________。
3. 按破岩方法，可将钻眼方法分为________、________和________三大类。
4. 风动凿岩机内设有________、________和________三大部分来完成凿岩任务。

**三、简答题**

1. 简述岩石的单轴抗压强度定义及两种主要破坏形态。
2. 试阐述冲击、切削、滚压和磨削4种常用的机械破岩方法及其破岩机理。
3. 简述凿岩机按工作动力来源的分类。
4. 简述与冲击式凿岩机比较，岩石电钻的优点。
5. 简述钻眼方法分类。

# 第5章 岩石爆破作用原理

炸药爆炸施加于岩石的是冲击荷载，压力峰值高、作用时间短，属于动力学范畴，研究岩石的爆破破碎必须研究岩石的动态特性。岩石的可爆性是指岩石对爆破破坏的抵抗能力和岩石爆破破坏的难易程度。岩石的可爆性是岩石自身的物理力学性质和炸药、爆破工艺的综合反映，它在岩石爆破过程中表现出来，并影响着整个爆破效果。

## 教学目标

(1) 熟知岩石爆破破碎机理，理解并掌握岩石中爆炸应力波的基本概念和传播规律。

(2) 理解药包的内部作用和外部作用，掌握爆破漏斗的几何要素。

(3) 学会装药量的有关计算，理解并掌握影响爆破作用效果的因素。

## 教学要求

| 知识要点 | 能力要求 | 相关知识 |
|---|---|---|
| 岩石爆破破碎机理 | 熟悉 | 关于岩石爆破破碎机理的4种假说 |
| 岩石中的爆炸应力波 | 掌握 | 爆炸冲击荷载；冲击波；应力波的基本概念与传播方程；地震波 |
| 药包的内部作用和外部作用 | 掌握 | 内部作用形成的粉碎区(压缩区)、破裂区和震动区；外部作用机理；爆破漏斗；利文斯顿爆破漏斗理论 |
| 装药量的计算原理 | 掌握 | 装药量计算的原理、炸药消耗量的确定方法 |
| 影响爆破作用效果的因素 | 掌握 | 爆轰压力、爆炸压力、炸药的波阻抗；药包与炮孔壁的耦合关系；爆破参数、堵塞质量； |





引例

### 岩石爆破点滴

岩石的爆破破碎是一个伴随着高温、高压、高速的瞬态过程，爆破过程中的岩石呈现动态特征，并且在几十个微秒到几十个毫秒内即完成，而岩石又是一种千变万化的非均质介质。因此，单从经典力学原理出发对其进行深入研究是十分困难的。但是，通过近几十年的工程实践和科学实验，科研工作者总结出了许多关于岩石爆破破碎机理的有价值的研究成果，形成了许多新的学说和理论体系。

若将一个球形药包埋在无限深的均质岩体中，随着离药包距离的不同，爆炸会产生不同的爆破效果。

直接与药包接触的岩石将受到超高压冲击波的冲击和压缩作用，这种压力大大超过岩石的动抗压强度。若岩石具有可塑性，将受到强烈压缩而形成压缩圈。但对大多数坚硬岩石来说，可塑性很小，岩石受到强烈冲击和压缩后将被粉碎，形成粉碎圈，其半径一般为药包半径的2～4倍。粉碎圈以外的岩石，受到衰减后应力波的径向压缩作用而引起切向拉伸，当拉伸应力超过岩石的动抗拉强度时，便在粉碎圈外产生放射状的径向裂隙，而爆生的高压气体便挤入裂隙中，促使裂隙进一步扩张和延伸；应力波通过后，受压缩的岩石迅速卸载，发生向心的径向运动，而引起环状的拉伸裂隙；径向和环状裂隙相互交错，将岩石割裂破碎而形成破裂圈。通过破裂圈以外的应力波，由于急剧衰减，应力大小已低于岩石的强度，再也不能引起岩石破碎，而只能引起岩石质点作弹性震动，形成震动圈。

## 5.1 岩石爆破破碎机理

关于岩石爆破破碎机理的假说，可以归结为4种。

1. 爆炸应力波反射拉伸理论(动力学观点)

这种理论认为，爆破时的岩石破坏主要是由于自由面上应力波反射转变成的拉伸波造成的。具体来讲就是：爆炸产生的冲击波在岩石中传播时，由于衰减转变成应力波，当应力波传到岩石自由面时，由于波的反射作用产生拉伸应力，而岩石抗拉强度比其抗压强度小得多，当拉伸应力大于岩石抗拉强度时，岩石发生拉伸破坏。

2. 爆生气体膨胀压力破坏理论(静力学观点)

这种理论认为，岩石的爆破破坏主要是由于爆生气体的膨胀压力作用于岩石造成的。爆炸产生的大量高温高压气体，在岩石内产生压应力场，压应力使岩石质点产生径向位移，由于自由面上各质点距药包中心的距离不同，质点所受压应力也不同，自由面垂线方向阻力最小，岩石质点位移速度最大，这样相邻质点位移速度不同会在岩石中产生剪应力，当剪应力大于岩石自身抗剪强度时，岩石发生剪切破坏。



3. 爆生气体和应力波综合作用理论

该理论认为岩石的爆破破碎是应力波和爆生气体膨胀压力共同作用的结果，只是两者作用的阶段和区域有差别。工程实践及实验表明，这种理论更加符合实际，而被学术界认同。其理论的基本内容有以下几方面。

(1) 在爆破应力波作用下，岩体内形成拉伸及剪切裂隙。

(2) 应力波在自由面处产生反射拉伸波，使自由面处岩石产生片落。

(3) 爆生气体侵入应力波作用下产生的裂隙中，使之进一步延伸张开，当爆生气体膨胀压力足够大时，将破碎岩石抛出。

这种理论的实质可以总结为：岩石在冲击波或应力波作用下产生裂隙，然后爆生气体渗入裂隙中，使应力波形成的裂隙进一步扩展。冲击波或应力波的破岩过程与岩石特性和装药条件等有关。哈努卡耶夫认为，岩石波阻抗不同，破坏时所需应力波峰值不同，岩石波阻抗高时，要求高的应力波峰值，他将岩石按波阻抗值分为3类。

(1) 岩石属于高阻抗岩石，波阻抗为$10\times10^5\sim25\times10^5$g/(cm$^2$·s)。例如，致密而完整的坚硬岩石，在爆破过程中以应力波反射拉伸破坏为主。

(2) 岩石属于中等波阻抗岩石，波阻抗为 $5\times10^5\sim10\times10^5$ g/(cm$^2$ · s)。这类岩石虽然坚硬，但裂隙较发育，在爆破过程中，应力波反射拉伸作用和爆生气体的压力都起作用。

(3) 岩石的波阻抗较低，波阻抗为 $2\times10^5\sim5\times10^5$ g/(cm$^2$ · s)。这类岩石较松软，因此爆破过程中，爆生气体的膨胀压力起主要作用。

4. 岩体爆破破碎的损伤力学观点

长期以来，在岩石爆破机理的研究中，主要围绕爆破动力学问题展开，对于岩石破坏准则仍沿用岩体静力学方法，采用拉应力破坏理论、莫尔破坏理论等。这种简化处理可用于解决不含地质结构面的均质岩体破坏问题。然而，大量的调查统计发现，岩体爆破过程中 80%以上的破坏面是沿着岩体各种原生结构面产生的，岩体破坏问题难以从岩体力学角度进行分析。考虑到岩体中的各类结构面虽然仍具有一定的强度，但相对于岩石强度而言却小得多，加之其所占空间体积又小，因而近年来人们在岩体爆破理论研究中引入损伤力学方法，提出了岩体爆破机理的损伤力学观点。

岩体由于成岩过程的复杂性以及成岩后的变动，不可避免地存在着初始损伤。冲击载荷作用于含有初始损伤的脆性岩石，将产生两种效应：一是材料强度的劣化，二是应力波能量的耗散。这反映初始损伤是影响岩石动态损伤和破坏的重要因素，同时岩石中的不连续界面，作为一种“能量屏障”使得裂纹扩展中止，只有当更多的能量提供非介质时才有可能产生新的裂纹。岩石的动态损伤及其演化是一个能量耗散过程，不同冲击载荷下岩石的损伤过程反映了断裂时损伤能量耗散的大小。



**小知识**

岩石爆破是一个复杂的过程，至于哪一种作用是主要作用，应根据不同的情况来确定。黑火药爆破岩石几乎不存在动作用，而猛炸药爆破时又很难说是气体膨胀起主要作用，因而往往猛炸药的炸容比硝铵类混合炸药的炸容要低。岩石性质不同，情况也不同。对松软的塑性土壤，波阻抗很低，应力波衰减很大，这类岩土的破坏主要靠爆生气体的膨胀作用。而对致密坚硬的高波阻抗岩石，应主要靠爆炸应力波的作用，才能获得较好的爆破效果。

## 5.2 岩石中的爆炸应力波

爆炸在岩体中所激起的应力扰动的传播称为爆炸应力波。爆炸应力波在距爆炸点不同距离处可能表现为冲击波、弹塑性应力波、弹性应力波和地震波，如图 5 - 1 所示。在爆

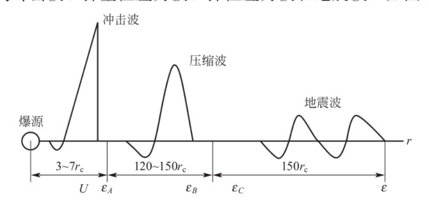



图 5 - 1　岩石中爆炸应力波随着距离的演变

炸点的近区产生冲击波，冲击波以超声速传播并具有陡峭波头，在波头上的岩石所有参数都发生突变，传播过程中能量损失大，衰减快。冲击波随着传播衰减，变成压缩应力波，波头变缓，以声速传播，仍具有脉冲性，但传播中能量损失比冲击波小，衰减较慢。随着传播距离的增大，压缩应力波衰减为具有周期性震动的地震波，以声速传播，衰减速度很慢。

## 5.2.1　岩石中的爆炸冲击荷载

岩石中的炸药爆炸时，最初施加在岩石上的是冲击荷载，在很短的时间内上升到几千甚至几万兆帕，而后又迅速下降、巨大的冲击荷载会在岩石中激起爆炸应力波。

炸药在岩石中爆炸后，能否形成冲击波取决于岩石及炸药特性和装药条件。在冲击荷载下岩石的典型变形曲线如图 5－2 所示，岩石中应力波的速度可以表示为

$$c=\sqrt{\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}\rho}=\sqrt{(1/\rho)(\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}\varepsilon)} \qquad (5-1)$$

式中，$\sigma$——应力，Pa；

$\varepsilon$——应变；

$c$——应力波速度，m/s；

$\rho$——岩石密度。

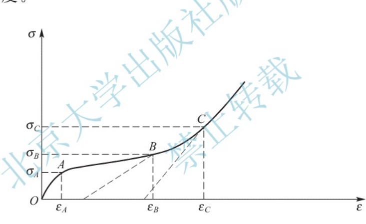





图 5－2　岩石在冲击荷载下的变形特性

如果是弹性波，则波速可表示为

$$c_p=\sqrt{E/\rho_{r0}} \qquad (5-2)$$

式中，$c_p$——弹性纵波速度，m/s；

$E$——岩石的弹性模量，Pa。

根据公式可以得出：岩石中大小不同的应力将产生性质不同的爆炸应力波。

(1) 在爆炸点附近，爆炸时产生的冲击荷载最高，如果 $\sigma>\sigma_C$，如图 5－3 所示，则形成陡峭波头，传播速度超过声速，即冲击包，冲击波波阵面上的岩石的所有参数都发生突变，但是衰减最快。

(2) 随着冲击波的传播衰减，当 $\sigma_B<\sigma<\sigma_C$ 时，如图 5－3 所示，由于 $\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}\varepsilon$ 随应力的增大而增大，其波速大于图中 $A$—$B$ 段的塑性波波速，但小于 $O$—$A$ 弹性段的波速，应力幅值大的塑性应力波追赶前面的塑性波，形成塑性波追赶加载，并形成陡峭波头，但波头速度不是超声速的，称为非稳定的冲击波。

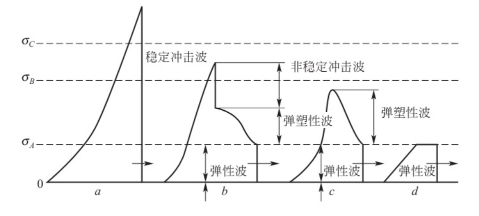



**图 5－3　不同应力幅值时岩体中传播的爆炸应力波**

(3) 当 $\sigma_A<\sigma<\sigma_B$ 时，如图 5－3 所示，由于 $d\sigma/d\varepsilon$ 仍然不是常数，而随着应力的增大而减小，因此应力处的应力扰动要比低应力扰动的传播速度慢，在传播过程中波阵面逐渐变缓，塑性波以亚声速传播，而低于 $\sigma_A$ 的应力以弹性波速度传播。

(4) 当 $\sigma<\sigma_A$ 时，如图 5－3 所示，$d\sigma/d\varepsilon$ 为常数，即线弹性模量 $E$。这时应力波为弹性波，以未扰动岩石中的声速传播。

以上 4 种情况分别对应从高应力到低应力产生不同性质的应力波。当岩体内的爆炸冲击荷载超过 $C$ 点应力时，将首先产生冲击波，随后衰减为非稳定冲击波、弹塑性波、弹性应力波和地震波。



## 5.2.2　岩石中的爆炸冲击波

当岩体内的爆炸冲击荷载超过图 5－2 中 $C$ 点应力时，将在岩石中产生冲击波。在冲击波作用下，波阵面上的岩石的各种状态参数发生突变，形成陡峭波头。在药包附近的岩石受冲进波的作用将产生塑性流动，因此可以将岩石看成流体。

岩石中的爆破冲击波参数主要有冲击波压力 $p$、冲击波速度 $D$、介质质点运动速度 $u$ 等。冲击波在传播过程中，由于能量的快速消耗，其峰值压力降低，岩石中冲击波的压力 $p$ 衰减规律为

$$p=p_2\bar{r}^{-\alpha} \tag{5-3}$$

式中，$p$——冲击波压力；

$p_2$——爆炸点处岩石界面上的初始冲击压力；

$\bar{r}$——比距离，$\bar{r}=r/r_0$，$r$ 为距药室中心的距离，$r_0$ 为药室半径；

$\alpha$——压力衰减指数，对于冲击波，近似取 $\alpha=3$。

$$D_0\cdot V=V_o(D-u)$$

$$D\cdot u=V(p-p_o)$$

$$2(e-e_o)=(p+p_o)(V_o-V)$$

式中，$V$、$e$——分别为体积($kg/m^3$)和内能(J)。

利用以上 3 个式子求波阵面上的各个状态参数，必须预先知道岩石的状态方程，对于密实岩石，其中的冲击波速和质点运动速度满足式(5－4)

$$D=a+b\cdot u \tag{5-4}$$

式中，$a$、$b$ 值必须通过实验确定(表 5－1)。

表 5-1 部分岩石的 a、b 值

| 岩石名称 | 密度/(kg/m³) | a/(m/s) | b | 岩石名称 | 密度/(kg/m³) | a/(m/s) | b |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 花岗岩 | 2630 | 2100 | 1.63 | 大理岩 | 2700 | 4000 | 1.32 |
| | 2670 | 3600 | 1.0 | 石灰岩 | 2600 | 3500 | 1.43 |
| 玄武岩 | 2670 | 2600 | 1.6 | | 2500 | 3400 | 1.27 |
| 辉长岩 | 2980 | 3500 | 1.32 | 泥质细砂岩 | — | 520 | 1.78 |
| 钙钠斜长岩 | 2750 | 3000 | 1.47 | 页岩 | 2000 | 3600 | 1.34 |
| 纯橄榄岩 | 3300 | 6300 | 0.65 | 岩盐 | 2160 | 3500 | 1.33 |
| 橄榄岩 | 3000 | 5000 | 1.44 | — | — | — | — |

这样可以求的冲击波阵面上的所有状态参数，冲击波传播速度和距离的经验关系式为

$$D=D_0-B(\bar{r}-1) \tag{5-5}$$

式中，$D$——冲击波传播的初始速度，m/s；

$B$——冲击波速度衰减常数，与炸药和岩石的性质有关。

从而可以求出冲击波的作用范围

$$r=r_0[1+(D_0-D)/B] \tag{5-6}$$

冲击波在岩石中传播时衰减很快，作用范围也很小，一般为装药半径的 3～7 倍，但是会消耗大部分的炸药能量，因此在实施爆破的过程中应尽量避免冲击波的产生。

**小知识**

岩石波阻抗越小，初始冲击波参数越小，冲击波传递给岩石的能量越小，而且大部分能量消耗在爆炸近区的塑性变形上，波的衰减很快。无论哪种岩石，如果提高炸药威力，则冲击波所有参数都相应增大。因此，岩石中的冲击波参数主要取决于岩石的波阻抗、炸药威力和装药方式。



### 5.2.3 岩石中的爆炸应力波概述

1. 应力波特性

炸药在岩石中的爆炸产生冲击波，冲击波衰减之后形成应力波。冲击波衰减为应力波后，其瞬时性和高强度的特点都有所减弱，因此应力波波形比较平缓，不如冲击波陡峭。应力上升时间比应力下降时间短，即应力波衰减较慢，作用范围较大，一般可达装药半径的 120～150 倍。波阵面上的岩石介质状态参数不像冲击波那样突变，但仍能促使岩石的变形和破坏。冲击波以超声速传播，且波速与波幅有关，波幅越高，波速越大。而应力波以岩石中的声速传播，与波幅无关。应力波的作用范围为岩石破坏的主要区域，其破岩作用如下。

（1）自由面产生反射拉伸波的破坏作用。

（2）破坏中区(即紧接冲击波作用的爆破以外部分)产生径向压应力和切向拉应力的破坏作用。

2. 应力波参数

随距离的增大，冲击波衰减成爆炸应力波，冲击波的瞬时性和高强度的特性均有所减

弱。与冲击波不同，应力波波头较缓，作用时间较长。岩石中爆炸应力波参数主要包括应力峰值 $\sigma_{max}$、作用时间 $t_s$、应力波冲量 $I_o$ 和应力波比能 $E_o$ 等。

1）应力峰值

应力波随其传播距离增大，应力峰值将不断减少，在对比距离 $\bar{r}$ 处得径向压应力峰值为

$$\sigma_{rmax}=\frac{p_r}{\bar{r}^{\alpha}} \tag{5-7}$$

式中，$p_r$——初始径向应力峰值；

$\alpha$——应力波衰减指数。

对于应力波，$\alpha$ 的值可用下列经验公式计算

$$\alpha=-4.11\times10^7\rho_{r0}c_p+2.92$$

或者

$$\alpha=2-\frac{\mu}{1-\mu} \tag{5-8}$$

式中，$\mu$——岩石的泊松比。

切向拉应力峰值可通过径向压应力峰值计算

$$\sigma_{\theta max}=b\sigma_{rmax} \tag{5-9}$$

系数 $b$ 与岩石的泊松比和应力波传播距离有关，爆炸近区的 $b$ 值较大($b\approx1$)，但随距离增大 $b$ 值迅速减小，并趋于只依赖于泊松比的固定值 $b=\frac{\mu}{1-\mu}$。因此得

$$\sigma_{\theta max}=\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_{rmax} \tag{5-10}$$

2）作用时间

应力上升时间与下降时间之和称为应力波的作用时间。上升时间和作用时间与岩性、装药量、应力波传播距离等的因素有关，它们之间的经验关系式为

$$t_r=\frac{12}{K}\sqrt{\bar{r}^{(2-\mu)}}Q^{0.05},\quad t_r=\frac{84}{K}\sqrt[3]{\bar{r}^{(2-\mu)}}Q^{0.2} \tag{5-11}$$

式中，$t_s$——作用时间，s；

$t_r$——上升时间，s；

$K$——岩石体积压缩模量，MPa；

$Q$——炮孔内装药量，kg；

$\mu$——岩石泊松比；

$\bar{r}$——比距离。

3）比冲量与比能量

应力波通过时，经单位面积传给岩石的冲量和能量称为比冲量和比能量，即

$$I_o=\int_0^{t_s}\sigma_r(t)\mathrm{d}t$$

$$e_o=\int_0^{t_s}\sigma_r(t)u_r(t)\mathrm{d}t$$

式中，$I_o$——比冲量，Pa·s；

$e_o$——比能量，N/m；

$u_r$——质点速度，m/s。

4）应力波应力与质点速度的关系

炸药爆炸在岩体内直接激起的应力波主要是纵波，但可以有不同的波面形状。例如，球

状装药于中心起爆时，激起球面波；柱状装药激起的则是柱面波；平面装药激起的是平面波。

在应力波的传播过程中，传播方向上的应力、质点速度和波速之间的关系可根据动量守恒定律导出

$$\left.\begin{aligned}\sigma&=\rho_{ro}c_p u_p\\ \tau&=\rho_{ro}c_s u_s\end{aligned}\right\}\tag{5-12}$$

式中，$\sigma$——纵波压应力，MPa；

$\tau$——横波切应力，MPa；

$\rho_{ro}$——岩石密度，kg/m$^3$；

$c_p$——纵波速度，m/s；

$c_s$——横波速度，m/s；

$u_p$和$u_s$——质点在$p$和$s$方向运动速度，m/s。

### 5.2.4　岩石中的爆炸地震波

随着距爆炸点的距离的增大，应力波将衰减为爆炸地震波，在此区域传播的是弹性波，已不能对岩石介质造成直接的破坏作用，只能扩大岩石内原有的裂隙和威胁爆破地点附近的建筑物的安全。爆破地震波对中、远区岩体产生的震动，虽然已衰减到不足以直接造成岩石破裂，但对于内部存在节理、层理、裂隙等弱面的岩石而言，仍然有可能引起这些弱面部分松裂，裂隙扩展延伸，形成一定范围的爆破松动区，从而大大降低岩体的承载能力和稳定性。

地震波是质点作周期性震动的弹性波。爆破时，建筑物的破坏主要取决于其附近地面运动的最大幅值、周期和震动持续时间。

爆破震动图中量得的每一条波形的最大幅值，只表示测点沿着某一方向运动的最大幅值，而实际运动的最大振幅，应是同一瞬间三个运动分量矢量和的最大值。若取正交直角坐标系的每一个坐标轴为一个运动分量，则三个分量的任一瞬间的空间运动幅值可表示为$u(x, y, z, t)$，$v(x, y, z, t)$，$w(x, y, z, t)$。该点任一瞬间的空间运动的振幅为

$$R(x, y, z)=\sqrt{u^2+v^2+w^2}\tag{5-13}$$

有些国家通常采用每个运动分量最大振幅的矢量和来表示空间运动矢量的最大振幅，这样的表述结果实际上偏大。也有些国家采用各个运动分量的最大幅值来表示爆破地震强度。

在大多数的爆破震动分析中，假定爆破时介质质点按照谐和运动规律进行，则有

$$\text{位移 } u=\frac{A}{2}\sin\omega t\tag{5-14}$$

$$\text{速度 } \dot{u}=\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=\frac{A}{2}\omega\cos\omega t=\frac{A}{2}\omega\sin\left(\frac{\pi}{2}+\omega t\right)\tag{5-15}$$

$$\text{加速度 } \ddot{u}=\frac{d^2u}{\mathrm{d}t^2}=\frac{A}{2}\omega^2\sin(\pi+\omega t)\tag{5-16}$$

此时的最大振幅分别为

$$\text{位移 } u_{\max}=\frac{A}{2}$$

$$\text{速度 } \dot{u}_{\max}=\frac{A}{2}\omega=\omega u_{\max}=2\pi f u_{\max}$$

$$加速度\ \ddot{u}_{max}=\frac{A}{2}\omega^2=\omega\dot{u}_{max}=\omega^2u_{max}=4\pi^2f^2u_{max}$$

式中，$\omega$——地震动的圆频率；

$f$——地震动的频率；

$A$——地震动波形的最大全振幅值。

实际上，爆破震动地面运动的波形、幅值和频率是随时间变化的，所以震动波形往往明显不对称，这时应用量取峰到谷的全幅的一半为最大幅值的方法，将会引起较大的误差。若利用量取的最大幅值，按谐和运动的假定换算其他的运动参数，将会带来更大误差。如果在波形上有明显、可靠的零线标记，则应量取从零线到峰（谷）的振幅作为幅值的最大值。

与天然地震比较，爆炸地震的特点是：震源能量小，影响范围不大，持续时间短，频率高，其强度、传播方向和持续时间能预计并加以控制。

影响地震波强度的主要因素是炸药量、爆心距。若近似地选择炸药和爆心距作为主要变量，则地震波强度的幅值可由下式表示

$$A=K\cdot Q^n\cdot R^{-m} \tag{5-17}$$

式中，$K$，$n$，$m$——常数；

$A$——地震波的最大振幅；

$Q$——装药量；

$R$——爆心距。

目前，有关爆破地震波最大震动强度的计算方法如下。

1. 日本采用地震波最大质点速度公式

$$V=K\cdot\frac{Q^{0.75}}{R^2} \tag{5-18}$$

式中，$V$——地震质点最大速度，cm/s；

$Q$——炸药量，kg；

$R$——爆心距，m；

$K$——场地系数，$K=100\sim900$。

2. 美国J·R·Derine提出地震波最大质点速度公式

美国矿务局对20个采石场和建设工地的爆破震动的观测数据进行了统计分析，这些数据是在爆心距从44.2～966m，炸药量从3.6～2095kg变化范围内得到的。岩石种类包括石灰石、闪辉岩和白云石。J. R. Derine提出地震波最大质点速度公式为

$$V=K\left[\frac{0.44R}{Q^{1/2}}\right]^{-\alpha}\times2.54 \tag{5-19}$$

式中，$K$、$\alpha$——场地系数，$K=0.657\sim4.04$，平均取$K=1.85$；$\alpha=1.083\sim2.346$，平均取$\alpha=1.536$；其他符号意义同前。

3. P·B·Attewell提出地震波最大质点速度公式

P·B·Attewell等人对欧洲采石场的爆破震动观测数据进行了统计分析，提出了地震波最大质点速度的公式

$$V=K\left(\frac{Q}{R^2}\right)^{\alpha} \tag{5-20}$$

式中，$K$、$\alpha$——场地系数，$K$=0.013～0.148，平均取 $K$=0.051；$\alpha$=0.64～0.96，平均取 $\alpha$=0.84。

其他符号意义同前。

4. M·A·萨道夫斯基提出地震波最大质点速度公式

前苏联学者 M·A·萨道夫斯基提出了地震波最大质点速度的公式

$$V=K\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{\alpha} \tag{5-21}$$

式中，$K$，$\alpha$——与岩石特性等因素有关的常数，介质为岩石时 $K$=30～70；为土质时$K$=150～250，平均值 $K$=200，$\alpha$=1～2。

其他符号意义同前。

考虑抛掷爆破时，质点最大振动速度为

$$V=\frac{K}{\sqrt[3]{f(n)}}\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{\alpha} \tag{5-22}$$

式中，$f(n)$ ——爆破作用指数函数，这一函数值可根据鲍列斯科夫的建议，由下式确定。

$$f(n)=0.4+0.6n^3$$

5. 中国科学院地球物理所提出地震波最大质点速度公式

$$V=K\left[\frac{Q^{0.6}}{R^{1.8}}\right] \tag{5-23}$$



式中，$K$——场地系数，$K$=158.2～398.1。其他符号意义同前。

我国许多单位对爆破地震波进行过观测，得到的公式基本一致，都是 $V=K\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{\alpha}$ 这种形式。$\alpha$ 值变化在 0.5～2.8 之间，平均值 $\alpha$=1.51。$K$ 值变化在 9～630 之间，平均值 $K$=175。$K$ 值变化较大。

6. 井下掘进爆破时地震波最大质点速度公式

在井下掘进巷道爆破时，计算爆炸地震波的质点最大振速可采用下列公式

$$V=\frac{K}{\sqrt{N}}\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{\alpha} \tag{5-24}$$

式中，$Q$——爆破的总药量，kg；

$R$——爆心距，m；

$N$——爆破延期段数；

$\alpha$——衰减指数；

$K$——地震作用系数。

$\alpha$ 与 $K$ 值决定于爆破方法和岩石特性，井下爆破经巷道围岩传播地震波时，一般取 $\alpha$=2，$K$=400。当延期间隔时间大于 30ms 时，每段都视为独立爆破，$Q$ 应代换成各段爆破中的最大药量，并取 $N$=1。

7. 建筑物塌落引起的地震波最大质点速度公式

对于建筑物拆除爆破时建筑物塌落振动引起的地震波，其最大质点速度可由下式计算

$$V=K_B\left[\frac{(M\sqrt{2h/g})^{1/3}}{R}\right]^2 \tag{5-25}$$

式中，$M$——冲击地面的解体构件质量，kg；

$g$——重力加速度，m/s²；

$h$——落高，m；

$R$——距下落地点的距离，m；

$K_B$——常数，一般取 30～40。

8. 地震波质点最大加速度公式

除了地震波的质点速度来反映振动强度以外，也有一些单位建议用地震最大加速度作为表示振动强度的指标。江苏省地震局和中国科学院工程力学研究所等单位，所采用的地震动最大加速度的公式为

$$a=K\left[\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right]^{\alpha} \tag{5-26}$$

式中，$a$——地震动最大加速度，m/s²；

$Q$——炸药量，kg；

$R$——爆心距，m。

如果是分散装药，爆心距可以用药量的加权平均值来计算。式中的 $K$ 和 $\alpha$ 值，建议按下面不同条件近似采用。

场地为坚硬基岩时，$K=150$，$\alpha=1.7$；场地为基岩时，$K=220$，$\alpha=1.67$；场地为覆盖浅层表土时，$K=300$，$\alpha=1.6$。

根据观测，地面震动的垂直向速度，常常不是最大，而水平向速度比较大。地震波的水平向加速度和垂直向加速度在离爆心不远的地方是同一量级的，在远离爆心的地方，地震波强度以水平向加速度为主。而且建筑物在竖向远比水平向具有较强的抗震能力。因此，把水平向最大加速度或速度值作为地震波强度的标准比较适宜。

另外，炮孔堵塞非常严密的装药爆破，如平巷掘进中的掏槽眼爆破，峰值质点速度可以比常规堵塞条件下的标准值大 5 倍或更多，因为附近没有自由面释放能量。

在总药量相同的条件下，分散装药要比集中装药的地震波强度小。出现这种结果的原因有两个：一是各个雷管起爆时间的离散，二是药包的间隔分布。



## 5.3 药包的内部作用和外部作用

空气与岩石介质的分界面称为爆破自由面。装药中心(轴)距自由面的距离称为最小抵抗线($W$)。在装药量一定的条件下，若最小抵抗超过某一临界值($W_e$)，当装药爆炸后，在自由面上就不会看到爆破迹象，说明爆破作用只发生在岩体内部，装药的这种作用称为内部作用，如图 5－4 所示。如果装药的最小抵抗小于其临界抵抗，当装药爆炸后，除在装药下方岩体内形成压碎圈、裂隙圈和震动圈外，装药上方一部分岩石将被破碎，脱离岩体，形成爆炸漏斗，这种作用称为外部作用。

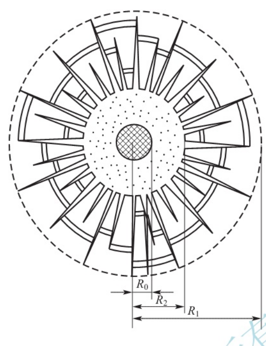



图 5-4 装药的内部作用



### 5.3.1 爆破的内部作用

爆破的内部作用可以认为是单个药包在无限岩石介质中的爆炸。炸药在岩体内部爆炸后，引起岩体内部不同程度的破坏，在距药包中心不同距离处，会形成 3 个区，即粉碎区（压缩区）、破裂区和震动区。

1. 粉碎区(压缩区)

炸药在无限岩石介质中爆炸时，瞬间产生巨大的冲击荷载，其强度远远超过了岩石的动态抗压强度。对于坚硬的岩石，在药包附近的岩石被高强冲击荷载压碎，因此该区称为压碎区；对于软弱岩石或者土壤则被冲击荷载压缩成空腔，并在空腔的外表层产生形成坚实的压实层，因此该区又称为压缩区。在粉碎区内，由于受到无限岩石介质的约束，冲击荷载的大部分能量用于岩石的粉碎、弹性变形及加热，导致冲击波和爆生气体的能量急剧下降，以至很快就不足以粉碎甚至压缩岩石，因此粉碎区的半径较小。有研究表明：对于球形装药，粉碎区半径一般为药包半径的 1.28～1.75 倍；对于柱形装药，粉碎区的半径一般为药包半径的 1.65～3.05 倍。但是由于岩石的动抗压强度都较高，粉碎压缩岩石会消耗冲击波和爆生气体的大部分能量，这对于爆破过程是有害的，因此在爆破过程中应尽量避免产生粉碎区。图 5-4 中 $R_0<R<R_2$ 区域即为粉碎区。

2. 破裂区

冲击波在传播到破裂区时，已衰减为应力波。在压应力波的作用下，在岩石径向会产生压应力和压缩变形，从而在切向产生拉应力和拉伸变形，岩石属于脆性材料，其抗拉强度比其抗压强度小得多，因此，当切向拉应力大于其抗拉强度时，在岩体中将产生径向贯通裂隙。图 5-4 中 $R_2<R<R_1$ 区域为破裂区。

应力波的作用首先在岩体内产生初始裂隙，随后，爆生气体进入裂隙中，爆生气体的膨胀、挤压和气楔作用下径向裂隙继续扩展延伸。

压应力波通过破裂区时，压缩破裂区内岩石，使岩石内部积蓄压缩势能，当应力波通过后，岩石内的压缩势能释放，形成与压应力波作用方向相反的径向拉应力，当此拉应力大于岩体抗拉强度时，将在岩体内部产生环向裂隙(图 5－4)。

在破裂区内，径向裂隙与环向裂隙交错产生，共同构成破裂区，破裂区内径向裂隙起主导作用，岩石的爆破破坏主要靠的就是破裂区。破裂区的作用半径一般在 70～120 倍的装药半径内。

3. 震动区

应力波通过破裂区后大大衰减，并逐渐趋于具有周期性的正弦波，这种波的应力值已经不能对岩石造成破坏，只能引起该区岩石质点的弹性振动，称为地震波。该区称为震动区。地震波会传播很远，直到地震波的能量完全被岩石吸收。图 5－4 中 $R>R_1$ 的区域为震动区，这一区域的范围要比压缩区和破坏区大得多。

## 5.3.2 爆破的外部作用



当药包在靠近自由面处时，药包爆炸后除了产生岩体的内部的破坏作用以外，还会在地表产生破坏作用，即爆破的外部作用。

1. 外部作用原理

外部作用是由于药包在岩体中爆炸后形成压缩波向四周传播，压应力波在自由面处一部分或全部反射形成与传播方向相反的拉应力波，拉应力波使得脆性岩石拉裂造成表面岩石与岩体分离，形成片落。当反射拉伸应力波衰减到不足以引起片落时，它还能使原先存在于径向裂隙尖端上的应力场得到加强，导致裂隙继续向前发展，于是环向和径向裂隙将岩体切割成碎块。由于爆炸作用能量分布不均，加之岩体本身存在不规则分布的节理和裂隙，使实际爆破后的岩块形大小不一、形状各异。

生产实践和科学实验表明，片落现象不是岩体破碎的主要过程，片落现象的产生主要同药包的几何形状、药包的大小、药包埋深、入射波的波长和岩石性质有关。爆破的外部作用主要还与自由面的存在有关。当炸药在距自由面较近的位置爆炸时，因爆生气体作用，在爆源近区岩体内形成的准静态应力场受到自由边界的影响，造成爆源与自由面间岩体的应力集中程度增加，使得这个区域内的岩体更易破碎，大量爆生气体沿自由面方向逸出。因此自由面方向是爆破外部作用的主导方向。

2. 爆破漏斗

爆破的外部作用除了造成岩体破碎外，还将部分破碎了的岩石抛掷一定的距离，在岩体表面形成一个漏斗形的坑，称为爆破漏斗，如图 5－5 所示。

1）爆破漏斗的几何参数

(1) 最小抵抗线 $W$：指药包中心距自由面的最短距离。爆破时，最小抵抗线方向的岩石最容易破坏，它是爆破作用和岩石抛掷的主导方向。

(2) 爆破漏斗半径 $r$：指形成倒锥形爆破漏斗的底圆半径。

(3) 爆破漏斗破裂半径 $R$：是指从药包中心到爆破漏斗底圆圆周上任一点的距离。

(4) 爆破漏斗深度 $H$：是指爆破漏斗顶点至自由面的最短距离。

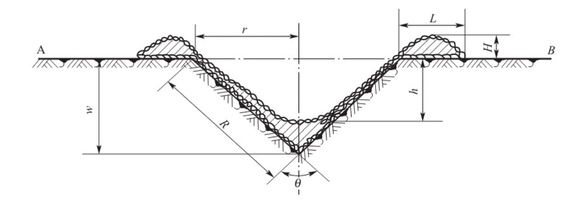



**图 5-5 爆破漏斗几何参数**

$\omega$—最小抵抗线；$\theta$—爆破漏斗张开角；$r$—漏斗半径；$L$—爆堆宽度；
$R$—爆破漏斗破裂半径；$H$—爆堆高度；$h$—可见漏斗深度

(5) 爆破漏斗可见深度 $h$：是指爆破漏斗中渣堆表面最低点到自由面的最短距离。

(6) 爆破漏斗张开角 $\theta$：即爆破漏斗的顶角。

2) 爆破作用指数

爆破漏斗底圆半径与最小抵抗线的比值称为爆破作用指数，用 $n$ 表示，即

$$n=r/W$$

3) 爆破漏斗的分类

根据爆破作用指数 $n$ 的大小，爆破漏斗可分为如下4种基本形式。

(1) 松动爆破漏斗：当 $0<n<0.75$ 时，爆破漏斗内的岩石被破裂松动，但不抛出坑外，不形成可见的爆破漏斗坑。

(2) 减弱抛掷爆破：当 $0.75<n<1$ 时，爆破漏斗为减弱抛掷爆破漏斗，漏斗张开角 $\theta<90°$。形成减弱抛掷爆破漏斗的药包称为减弱抛掷爆破或加强松动爆破药包。

(3) 标准抛掷爆破漏斗：当 $r=W$，即 $n=1$ 时，爆破漏斗半径 $r$ 与最小抵抗线相等，漏斗张开角 $\theta=90°$。形成标准抛掷爆破漏斗的药包叫做标准抛掷爆破漏斗药包。在确定不同种类岩石的单位炸药消耗量时，或者确定和比较不同炸药的爆炸性能时，往往用标准爆破漏斗的容积作为检查的依据。

(4) 加强抛掷爆破漏斗：当 $r>W$ 时，即 $n>1$ 时，爆破漏斗为加强抛掷爆破漏斗，漏斗张开角 $\theta>90°$，当 $n>3$ 时，爆破漏斗的有效破坏范围并不随 $n$ 值的增加而明显增大。实际上，这时炸药的能量主要消耗在岩块的抛掷和形成空气冲击波上。因此，$n>3$ 已无实际意思。通常加强抛掷爆破漏斗的作用指数为 $1<n<3$。

3. 利文斯顿爆破漏斗理论

利文斯顿在各种岩石、不同炸药量、不同埋深的爆破漏斗实验的基础上，论证了炸药爆炸能量分配给药包周围岩石以及地表外空气的方式，他提出了以能量平衡为准则的爆破漏斗理论。他认为炸药在岩体内爆炸时传给岩石能量的多少和速度的快慢，取决于岩石性质、炸药性能、药包重量、炸药埋深和起爆方式等因素。在岩石性质一定的条件下，爆炸能量的多少取决于炸药重量，炸药能量的释放速度与炸药传爆的速度密切相关。假设一定重量的炸药埋于地表下很深的地方，它爆炸所释放的能量绝大部分被岩石吸收。当岩石吸收的能量达到饱和状态时，岩体表面开始产生位移、隆起、破坏，直至

被抛掷出去。如果没有达到饱和状态时，岩石只是弹性变形而不被破坏。从爆破能量观点来看，药包埋设深度不变而改变药包重量，或者药量不变而减小埋深，所得效果相同。

当药包由深处向自由面移动时，传给自由面附近岩石的能量随之增加，当增加到一定程度时，自由面处岩石开始破坏。如果是脆性岩石，自由面将发生“片落”现象；如果是塑性岩石，自由面将发生“隆起”现象，并伴有裂隙的产生。此时的药包埋置深度称为临界深度 $W_e$。

利文斯顿给出了临界深度与炸药量 $Q$ 之间的关系为

$$W_e = E_b \sqrt[3]{Q} \tag{5-27}$$

式中，$E_b$——岩石变形能系数。

$E_b$ 的物理意义是指一定量的炸药在岩石中爆炸时，岩石表面开始破裂时岩石所能吸收的最大爆炸能量。当超过此能量限值时，岩石将由弹性变形转为破裂，它是可爆性的一个指标。对相同的岩石和炸药而言，$E_b$ 是常数。当 $Q$ 加大时，$W_e$ 随之加大；$Q$ 减小时，$W_e$ 亦随之减小，但两者比值不变。

当炸药量相同而炸药不同时，在同一种岩石中爆破，可以通过获得的 $E_b$ 值比较炸药的爆力。利文斯顿根据岩石爆破效果与能量平衡的关系，把岩石爆破时变形和破坏形态划分成 4 个带：弹性变形带、冲击破裂带、破碎带和空爆带。炸药爆炸后，爆炸能量消耗在岩石的弹性变形、岩石的破裂和破碎、岩块的抛掷和飞散、空气冲击波以及地震等方面。药包埋置深度发生变化时，各方面的能量消耗所占比例也会发生变化。一般情况下，使岩石产生弹性变形的能量消耗是不可避免的，用在岩石抛掷飞散、声波和地震的能量应该力求减小，设计中要使爆炸能量尽可能多地消耗在岩石的破碎上。

(1) 弹性变形带。当岩石爆破条件一定时，或者炸药量很小，或者炸药埋置很深，爆破作用只限于岩体内部。爆破后地表岩石不引起破坏，炸药的全部能量被岩石所吸收，岩石质点只产生弹性变形，爆破后岩石又恢复原状。此时炸药埋深的上限称为临界深度($W_e$)。

(2) 冲击破裂带。当岩石性质和炸药条件一定时，减少炸药埋深(即最小抵抗线小于临界深度 $W_e$ 时)，地表岩石破裂、隆起、破坏、抛掷，形成爆破漏斗。在爆破漏斗体积达到最大时，炸药能量得到充分利用，此时的炸药埋深称为最佳深度($W_i$)。

(3) 破碎带。当炸药埋深逐渐减少时(即最小抵抗线小于最佳深度时)，地表岩石更加破碎。爆破漏斗体积减小，炸药爆炸能量消耗于岩石破碎、抛掷和声响的能量增大。此时的炸药埋深称为过渡深度($W_g$)。

(4) 空爆带。当炸药埋深很浅时(即最小抵抗线小于过渡深度时)，药包附近的岩石比较粉碎，岩块抛掷更远。此时消耗于空气的能量远远超过传给岩石的能量，形成强烈的空气冲击波。

所以说：空爆带的上限是地表，炸药埋深 $L=0$。空爆带的下限即冲击破裂带的上限，此时炸药埋深为过渡深度，即 $W=W_g$，此时炸药埋深为最佳深度，即 $W=W_i$。冲击破裂带的下限，即弹性变形的上限，此时炸药埋深为临界深度，即 $W=W_e$。弹性变形带的下限是地下深处，即 $W>W_e$。

当药包埋置在最佳深度时，形成最大的漏斗体积，此时炸药能量主要都用在岩石破碎上。根据采矿生产爆破的要求和岩石特性，合理地确定炸药埋深(最小抵抗线)和炸药量，对提高爆破产量，改善爆破效果有着重要的意义。

**小知识**

自由面的存在改变了岩石由爆生气体膨胀压力形成的准静态应力场中的应力分布和应力值的大小，使岩石更容易在自由面方向受到剪切破坏。由此可见，自由面在爆破破坏过程中起着重要作用，它是形成爆破漏斗的重要因素之一。自由面既可以形成片状漏斗，又可以促进径向裂缝的延伸，并且还可以大大地减少岩石的夹制性。自由面越大、越多，越有利于爆破的破坏作用。自由面与药包的相对位置对爆破效果的影响也很大。当其他条件相同时，炮孔与自由面的夹角越小，爆破效果越好。

## 5.4 装药量计算原理



由于受到岩石物理性质多变的影响，并且对爆破破岩机理未能彻底了解，因此精确确定爆破装药量的问题至今尚未得到合理解决。但是工程技术人员通过大量的工程实践，总结爆破过程中的经验与规律，提出了许多装药量的经验计算公式。

### 5.4.1 集中药包装药量计算

有人提出在确定岩体爆破装药量时，炸药爆破做功考虑3部分：第一部分，使岩体破裂面上产生拉应力与剪应力，并将岩石从岩体中分离出来，形成爆破漏斗；第二部分，使爆破漏斗内的岩石破碎，这一部分消耗的装药量与岩石体积成正比；第三部分，将破碎岩石从爆破漏斗中抛出。

归结以上3部分装药量消耗，单个药包的装药量计算公式为

$$Q=C_1W^2+C_2W^3+C_3W^4 \tag{5-28}$$

式中，$C_1$、$C_2$、$C_3$——系数；

$W$——最小抵抗线，m。

在实际工程计算中，往往忽略第一、第三项，即 $Q=C_2W^3$，也就是目前常用的体积公式。体积公式是有相似法则得出的，相似法则的内容为：在一定的炸药和岩石条件下，岩石爆破破碎的体积与所用的装药量成正比，即

$$Q=qV \tag{5-29}$$

式中，$Q$——单个药包的装药量，kg；

$q$——单位体积岩石的炸药消耗量，kg/m³；

$V$——爆破漏斗体积，m³。

对于标准抛掷爆破，爆破作用指数 $n=1$，即 $r=W$，则爆破漏斗体积为

$$V=\frac{1}{3}\pi r^2W\approx W^3 \tag{5-30}$$

所以标准抛掷爆破的装药量为

$$Q=qW^3 \tag{5-31}$$

式(5-31)称为豪赛尔公式，也是最基本的爆破装药计算公式。

当岩石性质、炸药品种和药包埋深都不变时，只改变装药量，可得到非标准抛掷爆破漏斗，适用于各类抛掷爆破漏斗的装药量计算公式

$$Q=f(n)qW^3 \tag{5-32}$$

式中，$f(n)$——爆破作用指数的函数。标准抛掷爆破时，$f(n)=1$；加强抛掷爆破时 $f(n)>1$；减弱抛掷爆破时，$f(n)<1$。

应用最广泛的爆破作用指数函数为

$$f(n)=0.4+0.6n^3 \tag{5-33}$$

即

$$Q=(0.4+0.6n^3)qW^3 \tag{5-34}$$

式(5-34)可作为非标准抛掷爆破的计算公式，在应用于加强抛掷爆破时，与实际情况符合地更好。

对于松动爆破，其装药量大约为标准抛掷装药量的0.33～0.55倍，因此松动爆破计算装药量时采用式(5-35)

$$Q=(0.33\sim0.55)qW^3 \tag{5-35}$$

计算时根据岩石可爆性高低进行取值，岩石可爆性好时取较小值，可爆性差时取较大值。



### 5.4.2 延长药包装药量计算

延长药包在实际爆破工程中应用最为广泛，当延长药包长度方向垂直于自由面时，其装药量的计算原理跟集中药包装药量计算相同，仍按体积公式计算

$$Q=f(n)qW^3 \tag{5-36}$$

式中，$Q$——装药量，kg；

$W$——最小抵抗线，m，取值为

$$W=h_2+\frac{1}{2}h_1$$

式中，$h_2$——堵塞长度，m，

$h_1$——装药长度，m。

式(5-36)中，$f(n)$的取值与集中装药时相同。

### 5.4.3 单位体积岩石的炸药消耗量值的确定

其确定方法有以下几种。

(1) 查表，参考有关定额和有关数据。$q$的取值见表5-2。

表 5-2 单位体积岩石耗药量

| 岩石名称 | 岩石静态单轴抗压强度/MPa | 单位耗药量 $q/(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$ | |
|---|---|---|---|
| | | 松动爆破 | 抛掷爆破 |
| 松软的、坚实的各种土 | ＜10 | 0.3～0.5 | 1.0～1.2 |
| 重砂粘土、密实的土夹石 | 8～10 | 0.4～0.6 | 1.1～1.3 |
| 坚实粘土、硬质黄土、白垩土 | 10～20 | 0.35～0.5 | 1.1～1.5 |
| 石膏、泥石灰、蛋白石、页岩 | 20～40 | 0.5～0.6 | 1.2～1.8 |
| 贝壳石灰岩、砾石、裂隙凝灰岩 | 40～60 | 0.4～0.7 | 1.3～1.6 |
| 泥石灰、灰岩、沙质砂岩、层状砂岩 | 60～80 | 0.5～0.6 | 1.35～1.65 |
| 白云岩、钙质砂岩、镁质岩、大理石 | 80～100 | 0.5～0.65 | 1.5～1.95 |
| 石灰岩、砂岩 | 100～120 | 0.6～0.7 | 1.5～2.0 |
| 片麻岩、正长岩、闪长岩、伟晶花岗石 | 120～140 | 0.65～0.75 | 1.6～2.2 |
| 伟晶粗晶花岗石、完整片麻岩 | 140～160 | 0.7～0.8 | 1.8～2.4 |
| 花岗岩、花岗闪长石 | 160～200 | 0.7～0.85 | 2.0～2.55 |
| 安长岩 | 200～250 | 0.7～0.9 | 2.1～2.70 |
| 石灰岩 | ＞250 | 0.6～0.7 | 1.8～2.1 |
| 斑岩、玢岩 | ＞250 | 0.8～0.85 | 2.4～2.55 |

(2) 参照相似条件的爆破工程的炸药消耗量。

(3) 通过标准爆破漏斗试验求算。

(4) 根据经验公式确定

$$q=0.4+\left(\frac{\gamma}{2450}\right)^2 \tag{5-37}$$

式中，$\gamma$——岩石的重力密度。

## 5.4.4 药包群爆破时装药量的计算

实际工程爆破中，大多采用药包群进行爆破，并且常常采用多自由面爆破的方法提高爆破效果。在计算平行炮孔群的装药量时，一般先根据具体情况确定每个炮孔所能爆破的岩石体积，分别求出每个炮孔的装药量，再计算总的装药量。

**小知识**

装药量计算的原则是，装药量的多少取决于要求爆破的岩石体积、爆破类型等。但是爆破的质量问题的重要性随着采矿工作的发展日益突出，却都未能在计算公式中反映出来。虽然如此，但体积公式一直沿用至今，给人们提供了估算装药量的依据。在长期的生产实践中，都用体积为依据，结合各自矿山岩石性质和爆破的要求，改变不同的炸药单耗量，进行装药量的计算。

## 5.5 影响爆破作用效果的因素

影响爆破效果的因素很多，归结起来主要有炸药性能、装药结构、爆破条件、工程地质条件等。

### 5.5.1 炸药性能的影响

炸药的密度、爆热、爆速、爆炸压力和猛度等性能指标反映了炸药爆炸时的做功能力，直接影响炸药的爆炸效果。影响爆破作用的炸药性能主要有爆轰压力、爆轰气体产物的体积、炸药的波阻抗以及炸药的能量利用率等，这些因素之间又多相互关联。

1. 爆轰压力

爆轰压力是指炸药爆炸时爆轰波波阵面中 C－J 面所测得的压力。当爆轰波传播到炮孔壁面上时，在孔壁岩体中产生强烈的冲击波，这种冲击波在岩体中传播会引起岩石的粉碎和破裂。一般来说，爆轰压力越高，在岩体中激发的冲击波的初始峰值压力、产生的应力和应变也越大，从而越有利于岩体的破裂，尤其是在爆破坚硬致密的岩体时更是如此。但并不是对所有岩体来说爆轰压力越高越好，对某些岩体来说，爆轰压力过高将会造成炮孔周围岩体的过度粉碎，浪费能量。此外，爆轰压力越高，冲击波对岩体的作用时间越短，冲击波的能量利用率低，而且造成岩体破碎不均匀。因此，必须根据岩体性质及工程要求来合理选用炸药品种。



2. 爆炸压力

爆炸压力是指炸药在完成爆炸反应以后，爆轰气体产物膨胀作用在炮孔壁上的压力。它是对破碎效果起决定作用的因素，在爆破过程中，爆炸压力对岩体膨胀起胀裂、推移、和抛掷作用。一般来说，爆炸压力越高，对岩体的胀裂、推移和抛掷的作用越强烈。

在爆破破岩过程中，冲击波的作用超前于爆轰气体产物的膨胀作用，冲击波在岩体中造成的初始变形(或裂隙)，为爆压的胀裂作用创造了有利条件。另外，炸药的爆轰反应是一个极短暂的过程，往往在岩体尚未破碎之前就结束了。所以，爆轰压力的作用时间短于爆压作用时间，这有利于由爆炸应力波在岩体中造成的初始裂隙进一步得到延伸和发育，有利于提高爆炸能量的利用率。

爆炸压力的大小取决于炸药的爆热、爆温、爆轰气体生成量以及装药结构等，爆炸压力的作用时间除与炸药本身的性能有关外，还与装药阻塞质量有关。因此在爆破工程中除了选用与爆破介质相适宜的炸药品种外，还应注意阻塞质量。

3. 炸药的波阻抗

炸药的波阻抗是指炸药密度与其爆速的乘积。炸药爆轰时传递给岩体的能量多少、传递效率与岩石波阻抗和炸药波阻抗有着直接关系。通常认为炸药的波阻抗值与岩石的波阻抗值越接近，则炸药爆炸能量传递效率越高，在岩体中引起的应变值越大，获得的爆破效果越好。炸药与岩石波阻抗匹配这一准则的理论基础是声速的透射原理。对高阻抗岩石，

因其强度较高，为使裂隙发展，应力波应具有较高的应力峰值；对中等阻抗岩石，应力波峰值不宜过高，而应增大应力波的作用时间；在低阻抗岩石中，主要靠气体静压形成破坏，应力波峰值应尽可能削掉。为提高炸药能量传递效率，炸药阻抗应尽可能与岩石阻抗相匹配。岩石阻抗越高，炸药密度和爆速应越大。若无合适性能的炸药可供选择时，可改变装药结构控制应力波参数。由于炸药爆炸在岩石首先产生的是冲击波，因此炸药与岩石冲击波阻抗匹配情况可以作为炸药透射能量的标准。

## 5.5.2 装药结构的影响

钻眼爆破中装药结构对爆破效果的影响很大。根据炮眼内药卷与炮眼、药卷与药卷之间的关系以及起爆位置，常见装药结构可以分为以下几种。

（1）按药卷与炮眼的径向关系分为耦合装药和不耦合装药。耦合装药药卷与炮眼直径相等或采取散装药形式。不耦合装药药卷与炮眼在径向有间隙，间隙内可以是空气或其他缓冲材料(如水或岩粉等)。

（2）按药卷与药卷在炮眼内的轴向关系分为连续装药和间隔装药。连续装药各药卷在炮眼轴向紧密接触，间隔装药是药卷(或药卷组)之间在炮眼轴向存在一定长度的空隙，空隙内可以是空气、炮泥、木垫或其他材料。

1. 药包与炮孔壁的耦合关系

不耦合装药是指炮孔(或药室)直径大于装药直径的装药形式。而不耦合系数是炮孔直径与药卷直径之比。

在一定的岩石和炸药条件下，采用不耦合装药可以增加炸药用于破碎和抛掷岩石能量的比例，提高炸药能量的有效利用率、改善岩石破碎的均匀度、降低大块率、提高装岩效率；还能降低炸药消耗量有效地保护围岩免遭破坏。这种装药结构在光面爆破和预裂爆破中得到广泛应用。

采用不耦合装药可以增大爆炸应力波的作用时间，减小应力波的频率。在岩体中，应力波峰值的衰减不仅取决于岩体的性质，而且取决于应力波的频率，低频波衰减较慢，而高频波衰减得较快。耦合装药爆破，孔壁处压力较高，但压力峰值随距离衰减较快，较高的压力峰值在孔壁近处，形成强烈破碎区；由于耦合装药孔壁压力高、作用时间短，因此孔壁近区的加载速率较高，而加载速率越高，岩石介质内形成的爆炸裂缝就越容易分岔。不耦合装药爆炸后，其相应的加载率较小，炮孔近区裂隙较小，破碎程度较轻。由于耦合装药在孔壁近处消耗了大量能量，甚至产生过粉碎而损失能量，因此必然影响爆破效果。

高频波衰减较大，在一定范围外，耦合装药的爆炸应力波峰将小于不耦合装药爆炸应力波的峰值。因此在爆破远区不耦合装药的爆炸效果必然优于耦合装药，能量分布比较均匀。

在裂隙发育岩体内，采用空腔不耦合爆破更有利于提高爆炸能量利用率，提高破碎效果。因为应力波通过含充填物裂隙时的应力衰减主要决定于应力波的波长或应力波的作用时间。采用不耦合装药增大了应力波作用时间，降低了应力波在裂隙性岩体内的衰减程度，从而提高了爆炸能量的利用。

在光面爆破和预裂爆破中，最优不耦合系数应保证炮孔孔壁的平均压力小于或等于岩石三向动态抗压强度。

2. 起爆点位置的影响

起爆用的雷管或起爆药柱在装药中的位置称为起爆点。起爆点放在什么位置决定药包爆轰波传播方向和应力波以及岩石破裂的发展方向。在炮眼爆破法中，根据起爆点在装药中的位置和数目，将起爆方式分为正向起爆、反向起爆和多点起爆。

单点起爆时，如果起爆点位于装药靠近炮眼口的一端，爆轰波传向炮眼底部，称为正向起爆。反之，当起爆点置于装药靠近眼底的一端，爆轰波传至眼口，就称为反向起爆。在同一炮眼内设置一个以上的起爆点称为多点起爆。沿装药全长敷设导爆索起爆，使炸药几乎同时起爆是多点起爆的一个极端形式。

试验和经验表明，起爆点位置是影响爆破效果的重要因素。在岩石性质、炸药用量和炮眼深度一定的条件下，与正向起爆相比，反向起爆可以提高炮眼的利用率、降低岩石的夹制作用、降低大块率。

与正向起爆相比，反向起爆也有其不足之处。例如，需要长脚线雷管，装药比较麻烦；在有水深孔中起爆药包容易受潮；装药操作的危险性增加，机械化装药时静电效应可能引起早爆等。

无论是正向起爆还是反向起爆，岩体内的应力分布都是很不均匀的。如果相邻炮眼分别采用正、反向起爆，就能改善这种状况。采用多点起爆，由于爆轰波发生相互碰撞，可以增大爆炸应力波参数，包括峰值应力、应力波作用时间及其冲量，从而能够提高岩石的破碎度。

在柱状长药包爆破时，传统的方法是把起爆药包布置在孔口药卷处，雷管底部朝向孔底，这样装药比较方便，而且节省导线。反向起爆则是把起爆药包布置在孔底，并使雷管底部朝向孔口。由于起爆点在孔底，有利于消灭留炮根的现象。

国内外试验研究资料表明，在较长药包中，不论雷管朝向何方，在起爆点前方和后方一定距离内爆破能力最强，距离爆源愈远，爆破效果愈差。因此在较长的条状药包爆破时，为提高爆炸能量利用率，应采用多点起爆。



### 5.5.3 爆破条件的影响

影响爆破作用效果的爆破条件因素较多，总体上主要受到爆破参数、自由面条件、堵塞质量和起爆顺序及其延迟时间等因素的影响。

1. 爆破参数

爆破参数主要指炸药单耗、装药量、孔径、孔深、炮孔或药包的间距以及最小抵抗线等，爆破参数的合理选取是获得预期爆破效果的基本前提，必须根据具体的工程要求与目的，在优化爆破方案的基础上，正确设计各爆破参数。

孔径大，炸药能量相对集中，爆破效率高，但破碎块度大。炮孔深度过大，装药量主要集中在炮孔下部，上部岩体不易充分破碎。孔深太小，不仅下部岩体破碎效果差，而且阻塞长度得不到保证，极易形成冲炮，产生飞石。

在炸药单耗确定后，装药间距与最小抵抗线的比值(即炮孔密集系数)对爆破有效作用

的影响很大。该值过小，爆破时岩体过早沿炮孔连线方向破裂，最小抵抗线方向的岩体却得不到充分破碎，大块率增大，且容易形成后冲和超挖；该值过大，则可能在相邻炮孔之间出现岩埂。

当孔网参数(孔距，排距、抵抗线)确定后，炸药单耗、装药量的选取就十分重要。炸药耗量过大，不仅容易形成岩体过度破碎，不利于被保护岩体的稳定与支护，而且使爆堆分散，飞石量增加，难以对爆破危害进行有效控制。因此，合理确定炸药耗量是实现控制爆破的基础。

2. 堵塞质量

堵塞就是针对不同的爆破方法采用炮泥或其他堵塞材料，将装药孔填实，隔断炸药与外界的联系。堵塞的目的是保证炸药充分反应，使之产生最大热量，防止炸药不完全爆轰；防止高温高压的爆生气体过早地从炮眼中逸出，使爆炸产生的能量更多地转换成破碎岩体的机械功，提高炸药能量的利用率。在有瓦斯与煤尘爆炸危险的工作面内，除降低爆轰气体逸出自由面的温度和压力外，堵塞用的炮泥还起着阻止灼热固体颗粒(如雷管壳碎片等)从炮眼中飞出的作用。

图 5－6 表示在有堵塞和无堵塞的炮孔中压力随时间的关系。从图中可以看出，在这两种条件下，爆炸作用对炮孔壁的初始冲击压力虽然没有很大的影响，但是堵塞却明显增大了爆轰气体作用在孔壁上的压力(后期压力)和压力作用的时间，从而大大提高了对岩石的破碎和抛掷作用。

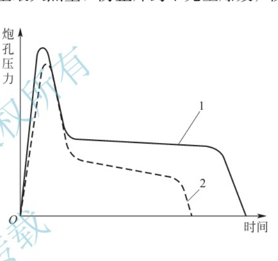



**图 5－6 堵塞对爆破作用的影响**

1—有堵塞；2—无堵塞



### 5.5.4 起爆顺序及其延迟时间的影响

在采用多排炮孔或多药室爆破时，起爆顺序与排间或药室间的延迟时间对爆破作用的影响较大，尤其是在群药包抛掷爆破中，对抛掷方向可起到控制作用。

为了控制爆破的作用方向、改善爆破效果、降低爆破地震波和飞石的危害，工程爆破中常采用分段起爆法，即在同一次爆破中将群药包或炮孔划分成不同的组别按照一定的先后顺序依次起爆(甚至在同一个炮孔中有时还采用分段装药毫秒延时爆破)。起爆顺序的设计决定了爆破作用的主导方向和爆破自由面的数目。例如，在采用主、副药室的硐室抛掷爆破中，若副药室的作用是为了将主药室的最小抵抗线方向由原来指向地表面变成副药室爆破后形成的新自由面方向，那么当主、副药室起爆顺序颠倒后，就会使主抛掷方向偏离设计的预定方向，不仅达不到预期目的，而且很可能带来灾难性安全事故。一般工程爆破中起爆顺序的确定，主要以形成尽可能多的自由面、改善爆破质量(块度适当、大块率低、爆堆集中等)、控制爆破主导方向和降低爆破危害为目的。因此，爆破施工中为保证按设计的顺序起爆，各药室或炮孔内的起爆雷管和起爆网络中的传爆雷管(包括继爆管和导爆管等)都必须按设计规定的段别选用。

### 5.5.5　岩性及地质构造的影响

不同类型的岩石性质不同，波阻抗也不同。为了提高炸药的爆炸能量利用率，获得较好的爆破效果，应尽可能选用与岩石波阻抗相匹配的炸药品种。另一方面，由于受地质构造的影响，即便是岩性相同或相近的岩体，也会因节理、裂隙、断层等地质构造的发育程度不同而使岩体的可爆性不同，因而爆破作用效果相差很大。

构造上不均质的岩石常会使爆破作用减弱，宏观裂隙能够阻止爆破能量的传递而使破坏区范围受到限制；横穿药包的裂隙能使爆轰气体的压力急剧下降而影响爆破效果。其他地质结构面对爆破也有不同程度的影响，主要表现在：加剧应力波能量的衰减；改变抵抗线的方向，造成欠爆或超爆；引起冲炮，造成爆破事故；降低爆破威力，影响爆破效果；造成施工安全事故，如岩溶水的威胁、开挖硐室的崩塌、陷落等现象；影响被保护岩体边坡的稳定等。

## 本 章 小 结

关于岩石爆破破碎机理的假说，可以归结为 4 种：①爆炸应力波反射拉伸理论(动力学观点)；②爆生气体膨胀压力破坏理论(静力学观点)；③爆生气体和应力波综合作用理论；④岩体爆破破碎的损伤力学观点。爆炸应力波在距爆炸点不同距离处可能表现为冲击波、弹塑性应力波、弹性应力波和地震波，药包的作用可以分为内部作用和外部作用，外部作用可以形成爆破漏斗。另外，本章还介绍了装药量的计算原理以及岩石炸药消耗量值的确定方法，阐述了影响爆破作用效果的主要因素，如炸药性能、装药结构、爆破条件、起爆顺序及其延迟时间、工程地质条件等。



## 习　　题

**一、名词解释**

爆炸应力波，冲击波，地震波，爆破自由面，最小抵抗线，爆破漏斗，爆轰压力，爆炸压力，炸药的波阻抗，炸药的能量利用率，不耦合装药、不耦合系数

**二、填空题**

1. 爆炸应力波在距爆炸点不同距离处可能表现为________、________、________和________。

2. 炸药在岩体内部爆炸后，引起岩体内部不同程度的破坏，在距药包中心不同距离处会形成 3 个区，即______________、________和________。

3. 影响爆破作用的炸药性能主要有：________、________、________和________。

4. 根据炮眼内药卷与炮眼、药卷与药卷之间的关系以及起爆位置，常见装药结构可以分为：按药卷与炮眼的径向关系分为________和________；按药卷与药卷在炮眼轴向的关系分为________和________。

## 三、简答题

1. 简述爆破内部作用和外部作用时，岩石的破坏过程。
2. 简述单位体积岩石的炸药消耗量值的确定方法。
3. 简述爆破漏斗的基本形式及其划分标准。
4. 简述岩石爆破破岩机理的 3 种假说。



# 第6章 起爆器材与起爆方法

炸药爆破时能在短时间内释放出巨大的能量，为了高效地利用这部分能量，在爆破工程中，任何装药都必须采用适当的起爆器材和相应的起爆方法，才能确保炸药安全、准确而可靠地爆炸，以达到爆破的目的。本章将对不同类型的起爆器材和起爆方法作系统地介绍，明确不同起爆器材和起爆方法的特点，针对工程实际，选择合适的起爆器材和起爆方法并设计合理的起爆网路，将大大提高爆破效率和安全系数。

## 教学目标

(1) 掌握各种起爆器材在爆破过程中所起的作用，并了解相关爆破器材的性能和使用条件。

(2) 学会根据不同的需要选择起爆方法，会设计起爆网路。

(3) 了解爆破作业先进的起爆方法及其进展。



## 教学要求

| 知识要点 | 能力要求 | 相关知识 |
|---|---|---|
| 起爆器材 | 掌握 | 雷管、导爆索、继爆管、继爆管、导爆管的作用及特点 |
| 电力起爆法 | 掌握 | 电力起爆器材和网路 |
| 非电起爆法 | 掌握 | 不同方法的特点 |
| 其他起爆方法 | 了解 | 气体起爆法、磁电起爆法、无线电遥控起爆系统 |


引例

### 违规违章——悲剧无可避免

用于爆破作业的民用爆破器材(雷管、炸药)，由于本身的易爆性和爆炸过程中的不确定性，在实际使用过程中，如填装炸药、起爆和爆破后处理不当、警戒不严、信号不明、安全间隔不够、违规违章或人为失误等原因，极易造成职员伤亡和设备毁坏的危险。2008年5月31日14时50分左右，某市一个采石厂在填装爆破炸药过程中发生一起爆炸事故，造成3人死亡2人重伤，其中2人当场死亡，一人因抢救无效于当晚死亡，其他2人全身炸伤面积80%致残。

该作业面共钻打炮眼(800cm×9cm)7个，每个炮眼间距为1.2m以上，炮眼呈单行排序不规则，间距不一致。爆炸时，第7个炮孔仍在钻孔作业。爆炸后经查确认，装药填塞完好的4个炮眼未炸，未作

填塞的第5个炮眼为爆炸点。经有关政府部门工作人员和专家组成的事故技术组对现场勘查确认，意外事故是因严重违规违章交叉作业所致。

其一，事故肇事者爆破员朱某明知爆破预装药危险作业区域严禁任何作业和职员在场的严格规定，但仍然进行预装药危险操纵，严重违反了国家《爆破安全规程》的相关规定；其二，打眼作业负责人熊某从事打眼作业多年，对打眼与预装药同时交叉作业的违规违章行为所造成的严重后果估计不足，在爆破员预装药时仍然盲目冒险进行钻孔作业；其三，安全员兼监炮员贡某明知严重违规违章作业的事故隐患未排除，既没有强行制止，又擅离职守；其四，企业内部安全治理制度落实不到位，对打眼和预装药同时交叉作业的严重违规违章等事故隐患采取的强制措施不力，企业主要负责人和安全治理职员工作责任性不强、安全意识淡薄。

# 6.1 常用起爆器材

炸药在一定条件下是具有相对稳定性的物质，必须借助于一定的外界能量作用才能使炸药产生爆炸。因此，将用来激发炸药爆炸的材料统称为起爆器材。常用的起爆器材包括雷管、导爆索、继爆管、导爆管、起爆药柱(或起爆具)等。

起爆器材的品种较多，根据起爆过程中所起作用的不同，起爆器材可分为起爆材料和传爆材料两大类。各种雷管属于起爆材料，导爆管属于传爆材料，导爆索既有起爆作用又具有传爆作用。



## 6.1.1 雷管

雷管是管壳中装有起爆药(起初装的起爆药是雷汞，故称雷管)，通过点火装置使其爆炸，再引爆加强药，而后引爆炸药的装置。雷管是各种雷管的简称，它可以引爆炸药、导爆索和导爆管。爆破工程中常用的工业雷管有电雷管和非电雷管等。电雷管又有瞬发电雷管、秒延期电雷管、半秒延期电雷管和毫秒延期电雷管等品种。




### 火 雷 管

火雷管是利用导火索传递的火焰来引爆雷管的。火雷管又称为普通雷管，它是工业雷管中结构最为简单的一个品种，也是其他各种雷管的基本组成部分，可以在地面爆破、隧道掘进、金属矿山、采石场及其他无瓦斯爆包尘爆炸危险的爆破作业中应用。

火雷管的实物如图6-1所示。火雷管的结构如图6-2所示，它由管壳、正起爆药、副起爆药和加强帽等几部分组成。

1. 管壳

火雷管的管壳通常采用金属(铝、铜、覆铜)或纸制成，呈圆管状。管壳必须具有一定的强度，以减小正、副起爆药爆炸时的侧向扩散和提高起爆能力，管壳还可以避免起爆药直接与空气接触，提高雷管的防潮能力。管壳一端为开口端，用来插入导火索；另一端做成密闭的圆锥形或半球面形的聚能穴，以提高该方向的起爆能力。



图 6-1　火雷管

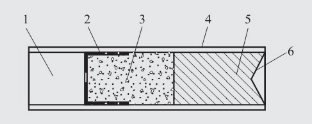



图 6-2　火雷管构造

1—引爆元件插口；2—加强帽；3—正起爆药；
4—管壳；5—副起爆药；6—聚能穴

2. 正起爆药

火雷管中的正起爆药(也称起爆药)在导火索火焰作用下首先起爆。其主要特点是敏感度高。它通常由雷汞、二硝基重氮酚或叠氮化铅制成。

3. 副起爆药

副起爆药也称加强药。它在正起爆药的爆轰作用下起爆，进一步加强了正起爆药的爆炸威力。它比一般正起爆药感度低，但爆炸威力大，通常由黑索金、特屈儿或黑索金-梯恩梯药柱制成。

4. 加强帽

加强帽是一个中心带小孔的金属罩。它通常用铜皮冲压制成。加强帽的作用为：减少正起爆药的暴露面积，增加雷管的安全性；在雷管内形成一个密闭室，促使正起爆药爆炸压力的增长，提高雷管的起爆能力，可以防止起爆药受潮。

工业雷管按其起爆药量的多少，分为 10 个等级。号数愈大，起爆药量愈多，雷管的起爆能力愈强。工业上大多使用 6＃和 8＃雷管。



1. 电雷管

电雷管（图 6-3）是以电能引爆的一种起爆器材。电雷管的起爆炸药部分与普通雷管相同，区别仅在它采用了电力引火装置，并引出两根绝缘导电线——脚线。它是电力起爆系统的主要部件。常用的电雷管有瞬发电雷管、延期电雷管以及特殊电雷管等。延期电雷管又分秒延期电雷管和毫秒电雷管。



图 6-3　普通电雷管

1）瞬发电雷管

瞬发电雷管由普通雷管、电引火头(引火药、电桥丝、脚线)及密封塞等构成。当电流通过桥丝时，桥丝炽热引燃引火药，使普通雷管爆炸。

（1）脚线。脚线是用来给电雷管内的桥丝输送电流的导线，通常采用铜和铁两种导线，外面用塑料包皮绝缘，长度一般为 2m。脚线要求具有一定的绝缘性和抗拉、抗挠曲及抗折断的能力。

（2）桥丝。桥丝在通电时能灼热，以点燃引火药或引火头。桥丝一般采用镍铬或康铜电阻丝，焊接在两根脚线的端线芯上，其直径为 0.03～0.05mm，长度为4～6mm。

（3）引火药。电雷管的引火药一般都是可然剂和氧化剂的混合物。目前，国内使用的引火药成分有 3 类：第一类是氯酸钾-硫氰酸铅类，第二类是氯酸钾-木炭类，第三类是在第二类的基础上再加上某些氧化剂和可燃剂。

另外，为了固定脚线和封住管口，在管口灌以硫磺或装上塑料塞。若灌以硫磺，为防

止硫磺流入管内，还装有厚纸垫或橡皮圆垫。使用金属管壳时，则在管口装一塑料塞，再用卡钳卡紧，外面涂以不透水的密封胶。

根据点火装置的不同，瞬发电雷管的结构有两种。一种为直插式，其特点是取消了加强帽。点火装置的桥丝上没有引火药，桥丝直接插入松散的二硝基重氮酚(DDNP)中，DDNP既是正起爆药，又是点火药。当电流经脚线传至桥丝时，灼热的桥丝直接引燃DDNP，并使之爆轰。另一种为引火头式，桥丝周围涂有引火药，做成一个圆珠状的引火头，当桥丝通电灼热，引起引火药燃烧，火焰穿过加强帽中心孔，即引起正、副起爆药的爆炸。

2）秒和半秒延期电雷管

秒和半秒延期电雷管的结构如图6-4所示。电点火元件与起爆药之间的延期装置是用精制导火索或在延期体壳内压入延期药构成的，延期时间由延期药的装药长度、药量和配比来调节。索式结构的秒或半秒延期雷管的管壳上钻有两个防潮作用的排气孔，排出延期装置燃烧时产生的气体。其起爆过程是：通电后引火头发火，引起延期装置燃烧，延迟一段时间后雷管爆炸。国产秒或半秒延期雷管的延期时间和标志见表6-1和表6-2，主要用于巷道掘进、采石场、土石方等爆破工程作业。在有瓦斯和煤尘爆炸危险的工作面不准使用秒延期电雷管。

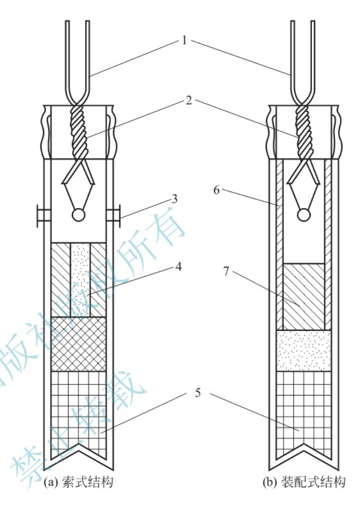




**图6-4 秒和半秒延期电雷管的构造**

1—脚线；2—电引火线；3—排气孔；4—精制导火索；5—火雷管；6—延期壳体；7—延期药

**表6-1 秒延期电雷管的段别、秒量及脚线颜色**

| 段别 | 延期时间/s | 脚线标志 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 0 | 灰红 |
| 2 | 1.2 | 灰黄 |
| 3 | 2.3 | 灰蓝 |
| 4 | 3.5 | 灰白 |
| 5 | 4.8 | 绿红 |
| 6 | 6.2 | 绿黄 |
| 7 | 7.7 | 绿蓝 |

表 6-2　半秒延期电雷管的段别与秒量

| 段别 | 延期时间/s | 标志 |
|---|---|---|
| 1 | 0 | 雷管壳上印有段别标志，每发雷管还有段别标签 |
| 2 | 0.5 | |
| 3 | 1.0 | |
| 4 | 1.5 | |
| 5 | 2.0 | |
| 6 | 2.5 | |
| 7 | 3.0 | |
| 8 | 3.5 | |
| 9 | 4.0 | |
| 10 | 4.5 | |

3）毫秒延期电雷管

毫秒延期电雷管简称为毫秒电雷管，它是通电后爆炸的延期时间是以毫秒量级来计量的电雷管。毫秒电雷管由普通雷管、延期药、电引火头及密封塞等构成，毫秒电雷管的结构如图 6-5 所示。毫秒电雷管的延期时间及其规格见表 6-3。

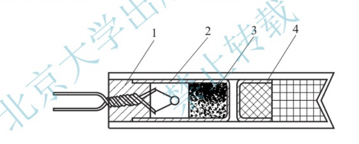



图 6-5　毫秒延期电雷管结构示意图

1—塑料塞；2—延期内管；3—延期药；4—加强帽



表 6-3　国产毫秒电雷管的规格

| 段别 | 第一系列秒量/ms | 第二系列 | | 第三系列秒量/ms | 第四系列秒量/ms | 第五系列秒量/ms |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 秒量/ms | 脚线颜色 | | | |
| 1 | <5 | <13 | 灰红 | <13 | <13 | <4 |
| 2 | 25±5 | 25±10 | 灰黄 | 100±10 | 300±30 | 10±2 |
| 3 | 50±5 | 50±10 | 灰蓝 | 200±20 | 600±40 | 20±3 |
| 4 | 75±5 | $75^{+15}_{-10}$ | 灰白 | 300±20 | 900±50 | 30±4 |
| 5 | 100±5 | 110±15 | 绿红 | 400±30 | 1200±60 | 45±6 |
| 6 | 125±7 | 150±20 | 绿黄 | 500±30 | 1500±70 | 60±7 |
| 7 | 150±7 | $200^{+20}_{-25}$ | 绿白 | 600±40 | 1800±80 | 80±10 |
| 8 | 175±7 | 250±25 | 黑红 | 700±40 | 2100±90 | 110±15 |

（续）

<table>
<tr><th rowspan="2">段别</th><th rowspan="2">第一系列秒量/ms</th><th colspan="2">第二系列</th><th rowspan="2">第三系列秒量/ms</th><th rowspan="2">第四系列秒量/ms</th><th rowspan="2">第五系列秒量/ms</th></tr>
<tr><th>秒量/ms</th><th>脚线颜色</th></tr>
<tr><td>9</td><td>200±7</td><td>310±30</td><td>黑黄</td><td>800±40</td><td>2400±100</td><td>150±20</td></tr>
<tr><td>10</td><td>225±7</td><td>380±35</td><td>黑白</td><td>900±40</td><td>2700±100</td><td>200±25</td></tr>
<tr><td>11</td><td>—</td><td>460±40</td><td>用标牌</td><td>1000±40</td><td>3000±100</td><td>—</td></tr>
<tr><td>12</td><td>—</td><td>550±45</td><td>用标牌</td><td>1100±40</td><td>3300±100</td><td>—</td></tr>
<tr><td>13</td><td rowspan="8">—</td><td>650±50</td><td>用标牌</td><td rowspan="8">—</td><td rowspan="8">—</td><td rowspan="8">—</td></tr>
<tr><td>14</td><td>760±55</td><td>用标牌</td></tr>
<tr><td>15</td><td>880±60</td><td>用标牌</td></tr>
<tr><td>16</td><td>1020±70</td><td>用标牌</td></tr>
<tr><td>17</td><td>1200±90</td><td>用标牌</td></tr>
<tr><td>18</td><td>1400±100</td><td>用标牌</td></tr>
<tr><td>19</td><td>1700±130</td><td>用标牌</td></tr>
<tr><td>20</td><td>2000±150</td><td>用标牌</td></tr>
</table>

毫秒电雷管的构造与秒延期电雷管基本相同，其区别在于延期装置的不同。毫秒电雷管的延期装置是延期药，常采用硅铁（FeSi 还原剂）和铅丹（$PbO_3$ 氧化剂）的混合物，并掺入适量的硫化锑（$Sb_2S_3$）以调节药剂的反应速度。为了便于装置，常用酒精、虫胶等做黏合剂造粒。通过改变延期药的成分、配比、药量及压药密度，可以控制延期时间。毫秒延期药反应时气体生成量很少，反应过程中的压力变化不大，反应速度很稳定，延期时间比较精确。

毫秒电雷管中还装有延期内管，它的作用是固定和保护延期药，并作为延期药反应时气体生成的容纳室，以保证延期时压力比较平稳。

4）油井电雷管

油井电雷管是油井射孔时不可缺少的起爆器材。它是一种耐压大、耐温性能好的特制电雷管。WY—2 型油井电雷管的结构如图 6－6 所示。

WY—2 型无枪身射孔电雷管（铁管壳），适用于井温 120℃和压力 34300kPa 以下的油井中，用以起爆无枪身射孔导爆索。

WY—2 型有枪身射孔电雷管（铜管壳），适用于井温在 120℃以下使用。

5）磁电雷管

为了减少和杜绝外来电的危害，1979 年英国化学工业公司（NEC）利用电磁感应原理发明了磁电起爆系统，继而该公司和诺贝尔公司生产销售了磁电雷管。

20 世纪 80 年代中期开始，我国煤炭科学研究总院、北京矿冶研究总院和中国兵器工业第 213 研究所相继成功研制了不同型号的磁电雷管和专用起爆器，并已应用于我国各油田和某些特定的爆破作业。

磁电雷管系指由特定的交流信号起爆的电雷管。将一个普通电雷管的两根脚线分别绕

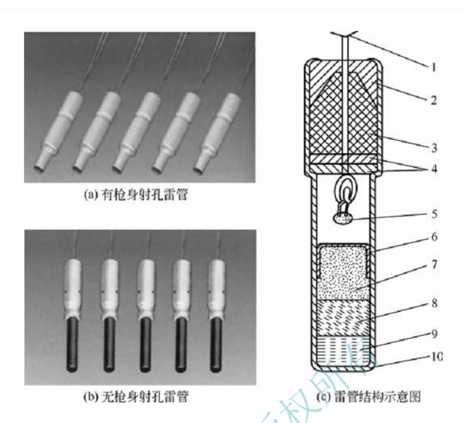



**图 6－6　WY—2 型油井电雷管结构示意图**

1—脚线；2—销套；3—胶塞；4—铁垫；5—引火头；6—加强帽；
7—二硝基氮酚；8—二次黑索金；9—一次黑索金；10—管壳



在环状磁芯(磁环)上的一个线圈的两端相连便构成了一个磁电雷管。图 6－7 是磁电雷管的基本结构示意图。

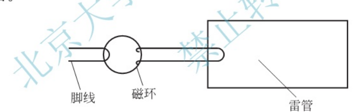



**图 6－7　磁电雷管基本结构示意图**

适用于油、气井射孔用的 CL—CW—180—1 型耐温、耐压磁电雷管的结构如图 6－8 所示。该雷管由一个普通电雷管、磁环、连接件和密封胶 4 部分组成。它是利用法拉第电磁感应原理设计而成的，即将电磁感应变压器安放在电雷管的电极塞内部，该线圈是一个

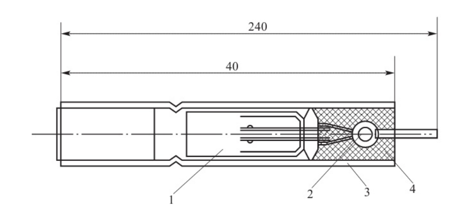



**图 6－8　CL—CW—180—1 型磁电雷管结构图**

1—电雷管；2—安全元件；3—连接管；4—密封胶

小型环状锰锌软磁铁氧体，电雷管的脚线构成变压器的次级线圈，初级线圈则由起爆回路中任一段起爆线在铁氧体环上绕数圈而成。因变压器次级引出线和雷管脚线相接，使电雷管发火桥丝与脚线形成闭合回路，使工频电、漏电杂散电流等不能进入发火桥丝而提高了产品对电的安全性。变压器初级采取了静电泄放通道的措施，提高了防静电的能力。该产品选用了耐温起爆药、耐温炸药及满足 180℃高温的环状锰锌软磁铁氧体材料，解决了产品的耐高温要求。

油、气井常用的磁电雷管型号有以下 2 种。

(1) CL—CW—180 耐温磁电雷管。该产品可耐温 180℃，可作为 89 枪、102 枪、127 枪等有枪身射孔弹的起爆雷管。

(2) CY 系列耐温耐压磁电雷管。该系列产品有 CY—50(耐压 50MPa)，CY—80(耐压 80MPa)和 CY—100(耐压 100MPa)等型号，可作为无枪身射孔弹的起爆雷管以及爆炸松扣等的起爆雷管。

6) 数码电子雷管

它是起爆器材领域里最为引人瞩目的进展。其本质在于用一个微型电子定时器(集成电路块)取代普通电雷管中的延期药和电点火元件，不仅使延期精度有很大提高，而且控制了通往引火头的电源，从而最大限度地减少了因引火头能量需求所引起的误差。每只雷管的延期可在 0～100ms 范围内按 ms 量级编程设定，其延期精度可控制在 0.2ms 以内。澳大利亚 Orica 公司、南非 AEL 和 Sasol 公司、瑞典 Nobel 公司和日本旭化成均相继推出了数码电子雷管产品，并在工程爆破作业中得到应用，日本已将该产品编入《爆破手册》中。



典型的数码电子雷管结构如图 6-9 所示，其性能主要表现在以下几个方面。

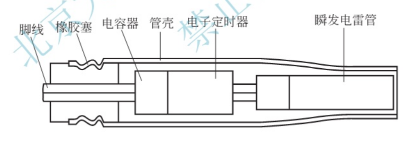



**图 6-9 数码电子雷管结构示意图**

(1) 延期：在 0～25ms 范围内(必要时亦可 0～100ms，甚至更宽)，可以以 1ms 的间隔根据需要任意设定。

(2) 延期精度：±0.2ms。

(3) 安全性：必须使用专用的起爆器起爆，可抵御静电、杂散电流、射频电等各种外来电。

2. 导爆管雷管

导爆管雷管又称非电雷管(图 6-10)，是专门与导爆管配套使用的一种雷管，是导爆管起爆系统的起爆元件。它与电雷管的主要区别在于：不用电雷管的电点火装置，而是用一个与塑料导爆管相连的塑料连接套，由塑料导爆管的爆轰波来点燃雷管。而导爆管本身可用电火花、火帽等引爆。

导爆管雷管由导爆管、封口塞、延期体和普通雷管组成。根据是否有延期体和延期时

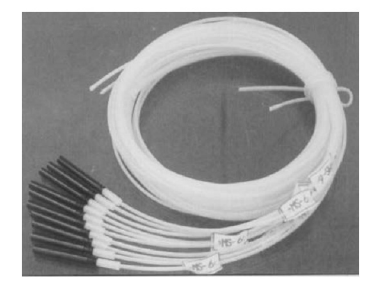


图 6-10　导爆管雷管

间的不同，现在生产的导爆管雷管主要有以下 4 种。

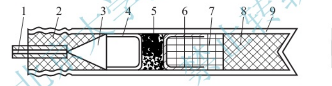
（1）瞬发导爆管雷管。

（2）毫秒(MS)导爆管雷管。

（3）半秒(HS)导爆管雷管。

（4）秒(S)延期导爆管雷管。

典型的导爆管雷管结构如图 6-11 所示。导爆管雷管具有抗静电、抗杂散电流的能力，使用安全可靠，简单易行，目前主要用于无沼气和粉尘爆炸危险的爆破工程。



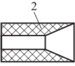





图 6-11　非电毫秒雷管结构示意图

1—塑料导爆管；2—塑料连接套；3—消爆空腔；4—空信帽；5—延期药；
6—加强帽；7—正起爆药；8—副起爆药；9—管壳

导爆管雷管又分为抗水型与非抗水型两种。前者要求在 20m 水深中浸水 8h 性能合格，后者要求在 1m 水深中浸水 24h 性能合格。

表 6-4、表 6-5 分别为几种导爆管雷管的结构特征和延期时间。

表 6-4　导爆管雷管的结构特征

| 雷管种类 | 瞬发 | | MS(HS) | | S 延期 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 雷管号数 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 结构类型 | 平底 | 凹底 | 平底 | 凹底 | 平(导火索) | 凹(延期体) |
| 外径/mm | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 6.9～7.1 | 7.1 | 6.9 |
| 长度/mm | 40 | 40 | 58～60 | 58～60 | 40 | 59 |
| 外壳材料 | 钢 | 其他金属 | 钢 | 其他金属 | 钢 | 其他金属 |

注：其他金属指铝、钢、铜、覆铜钢。

表 6-5 导爆管雷管的延期时间

| 段别 | MS 导爆管雷管延期时间/ms | HS 导爆管雷管延期时间/s | S 延期导爆管雷管延期时间/s | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 延期体类型 | 导火索类型 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 |
| 2 | 25 | 0.5 | 1 | 2.5 |
| 3 | 50 | 1.0 | 2 | 4.0 |
| 4 | 75 | 1.5 | 3 | 6.0 |
| 5 | 110 | 2.0 | 4 | 8.0 |
| 6 | 150 | 2.5 | 5 | 10.0 |
| 7 | 200 | 3.0 | 6 | — |
| 8 | 250 | 2.5 | 7 | — |
| 9 | 310 | 4.0 | 8 | — |
| 10 | 380 | 4.5 | — | — |
| 11 | 460 | — | — | — |
| 12 | 550 | — | — | — |
| 13 | 650 | — | — | — |
| 14 | 760 | — | — | — |
| 15 | 880 | — | — | — |
| 16 | 1020 | — | — | — |
| 17 | 1200 | — | — | — |
| 18 | 1400 | — | — | — |
| 19 | 1700 | — | — | — |
| 20 | 200 | — | — | — |



## 6.1.2 导爆索

导爆索是以单质猛炸药黑索金或泰安作为药芯，用棉、麻、纤维及防潮材料包缠成索状的起爆器材(图 6-12)。导爆索用雷管起爆后，可直接引爆炸药，也可以作为独立的爆破能源。

根据使用条件和用途的不同，目前国产导爆索主要有以下 7 种类型。

1. 普通导爆索

普通导爆索能直接起爆炸药，但是这种导爆索在爆轰过程中，会产生强烈的火焰，所以只能用于露天爆破和无瓦斯或矿尘爆炸危险的井下作业。其结构如图 6-13 所示。




**图 6-12　导爆索**



**图 6-13　普通导爆索结构示意图**

1—芯线；2—药芯；3—内层线；4—中线层；5—防潮层；
6—纸条层；7—外线层；8—涂料层

导爆索的药芯为黑索金或泰安，导爆索的爆速与芯药的密度有关。目前，国产的普通导爆索芯药密度为 1.2g/cm³，药量 12～14g/m，爆速不小于 6500m/s，导爆索的外径为 5.7～6.2mm，每(50±0.5)m 为一卷。导爆索受到摩擦、撞击、枪弹贯穿和燃烧时，都易引起爆炸。它的防湿性能良好，两端密封，放入 0.5m 深的常温静水中，经 24h 不失去爆炸性能；在(50±3)℃条件下保温 6h，其外观和传爆性能不变；在(－40±3)℃条件下冷冻 2h，取出后仍能结成水平结，按规定的连接方法用 8 号雷管起爆，爆轰完全；承受 500N 拉力后，仍能保持爆轰性能。导爆索的有效期一般为两年。

2. 安全导爆索

安全导爆索在结构上和普通导爆索相似，它和普通导爆索不同之处是黑索金药芯中添加有适量的消焰剂(通常是氯化钠)，使安全导爆索爆轰过程中产生的火焰小、温度低，不

会引起瓦斯、煤尘、矿尘爆炸。它专供有瓦斯、煤尘或矿尘爆炸危险的井下爆破作业使用。

安全导爆索的爆速大于 6000m/s，索芯黑索金药量为 12～14g/m，消焰剂药量为 2g/m。

3. 油井导爆索

油井导爆索是专门用来引爆油井射孔弹的，其结构与普通导爆索大致相似。为了保证在油井内高温、高压条件下导爆索的爆轰性能和起爆能力，油井导爆索增强了塑料涂层，并增大了索芯药量和密度。目前国产油井导爆索的主要品种包括有枪身油井导爆索和无枪身油井导爆索。

4. 震源导爆索

震源导爆索分为棉线和塑料震源导爆索两种，外观为红色或用户要求的颜色，每卷长度为(100±1)m。抗水性能：棉线震源索在深度为 1m(或压强 10kPa)、温度为 10～25℃的静水中浸泡 24h，用 8 号雷管起爆应完全爆轰。塑料震源索在深度为 2m(或压强 20kPa)、温度为 10～25℃的静水中浸泡 24h，用 8 号雷管起爆应完全爆轰。



5. 低能导爆索

近年来国内外研制成一种每米装药量很少的导爆索，叫做低能导爆索。这种导爆索爆炸所产生的噪声较低，又能降低成本，同时由于它的爆速高，克服了导爆管网路起爆时由于打断网路而产生拒爆的缺点，但必须与雷管配套使用。这种导爆索的性能如下。

(1) 每米装药量为 1.4、3、5、7、10g，也可按用户要求的规格生产。

(2) 爆速大于 7000m/s。

(3) 抗水性强，将低能导爆索的两端裸露，浸泡在 2m 深的水中 40 天，爆轰感度不变，爆速仍在 7000m/s 左右。

(4) 环境适应性强，在－40～＋80℃环境中放置 8h，爆轰稳定、完全。

(5) 易与非电毫秒延期雷管组成非电起爆系统。

6. 抗水导爆索

抗水导爆索适用于深水爆破作业。从两方面增强其抗水能力：一是用抗水性能好的材料包覆外层，如塑料外皮导爆索；另一方面是用高抗水炸药，如将药芯做成塑性的高威力炸药。

### 6.1.3 继爆管

继爆管是一种专门与导爆索配合使用的，且具有毫秒延期作用的起爆器材。导爆索与继爆管组合起爆网路，可以借助继爆管的毫秒延期作用，实施毫秒爆破。

1. 继爆管的结构和作用原理

继爆管的结构如图 6－14 所示。它实质上是装有毫秒延期元件的普通雷管与消爆管的组合体。较简单的继爆管是单向继爆管，如图 6－14(a)所示。当右端的导爆索 8 起爆

后，爆轰波和爆炸气体产物通过消爆管 1 和大内管 2 后，压力和温度都有所下降，但仍能可靠地点燃延期药 4，又不至于直接引爆正起爆药 DDNP。通过延期药来引爆正、副起爆药以及左端的导爆索。这样，两根导爆索中间经过一只继爆管的作用，实现了毫秒延期爆破。

继爆管的传爆方向有单向和双向之分。单向继爆管在使用时，如果首尾连接颠倒，则不能传爆，而双向继爆管没有这样的问题。由图 6-14(b)看出，双向继爆管中消爆管的两端都对称地装有延期药和起爆药，因此，它在两个方向均能可靠传爆。

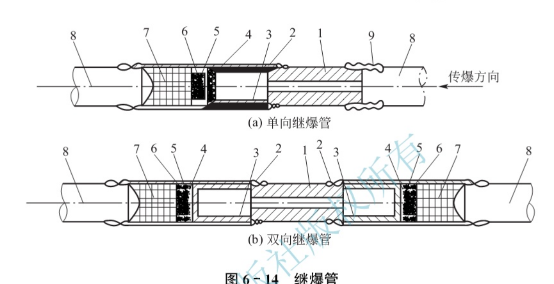



**图 6-14　继爆管**

1—消爆管；2—大内管；3—外套管；4—延期药；5—加强帽；6—正起爆药 DDNP；7—副起爆药 RDX；8—导爆索；9—连接管

双向继爆管在使用时，无需区别主动端和被动端，方便省事。但是它所消耗的元件、原料几乎要比单向继爆管多一倍，而且其中一半实际上是浪费的。尽管单向继爆管使用时费事一些，但只要严格认真地按要求去连接，效果是一样的。当然，在导爆索双向环形起爆网路中，则一定要用双向继爆管，否则就失去双向保险起爆的作用，图 6-15 是双向继爆管实物照片。



**图 6-15　双向继爆管**

2. 继爆管的段别和性能

根据延期时间长短，继爆管可分成不同的段别。表 6-6 为国产继爆管各段别的延期时间。

表 6-6 继爆管的延期时间

| 段别 | 延期时间/ms | | 段别 | 延期时间/ms | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 单向继爆管 | 双向继爆管 | | 单向继爆管 | 双向继爆管 |
| 1 | 15±6 | 10±3 | 6 | 125±10 | 60±4 |
| 2 | 30±10 | 20±3 | 7 | 155±15 | 70±46 |
| 3 | 50±10 | 30±3 | 8 | — | 80±4 |
| 4 | 75±15 | 40±4 | 9 | — | 90±4 |
| 5 | 100±10 | 50±4 | 10 | — | 100±4 |

继爆管的起爆能力不低于 8 号工业雷管。在高温(40±2)℃和低温(−40±2)℃的条件下试验，继爆管的性能不应明显的变化。继爆管采取浸蜡等防水措施后，也可以用于水中爆破作业。

继爆管具有抵抗杂散电流和静电危险的能力，装药时可以不停电，所以它与导爆索组成的起爆网路在矿山和其他工程爆破中都得到了广泛的应用。



### 6.1.4 导爆管

导爆管是塑料导爆管的简称，也称 Nonel 管。它是导爆管起爆系统的主体元件，用来传递稳定的爆轰波。

1. 导爆管结构

导爆管是一根内壁喷涂有薄层炸药粉末的空心塑料软管，其结构如图 6-16 所示。普通导爆管的管壁呈乳白色，管芯呈灰或深灰色。颜色应均匀，不应有明暗之分。管心是空的，不能有异物、水、断药和堵死孔道的药节等。

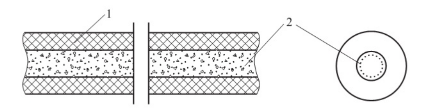



图 6-16 导爆管结构

1—塑料管壁；2—炸药药粉

(1) 管材：导爆管的管壁材料为高压聚乙烯塑料或能满足要求的其他热塑性塑料。

(2) 尺寸：导爆管尺寸与其品种有关，普通型号导爆管外径约 3mm，内径约 1.4mm。

(3) 装药：喷涂在导爆管内壁的炸药粉末组分为奥克托今或黑索金与铝粉的混合物，理论重量比为 91∶9，可适当加入少量的工艺附加物(如石墨等)。

(4) 药量：13～18mg/m(通常取 16mg/m)。

2. 导爆管传爆原理

当导爆管受到一定强度冲击形式的激发冲量作用时，管壁强烈受压(侧向起爆时)或管

内腔受到激发冲量的直接作用(轴向起爆时)，使管内壁的混合物粉末涂层表面产生迅速的化学反应，反应放出的反应热一部分用来维持管内的温度和压力，另一部分用来使余下的药粉继续反应。反应产生的(中间)产物迅速向管内扩散，并与空气混合后再次发生剧烈的反应。爆炸时所放出的热量和迅速膨胀的气体支持前沿冲击波继续向前稳定传播而不致衰减，同时前移的冲击波又激起管壁上未反应的药粉产生爆炸变化，这个过程的循环就是导爆管稳定传爆的过程。

导爆管的传爆对其管壳是无损的，即爆轰波在管内传播时管壁完好无损，即使偶尔出现管壁破洞，也不会对人体产生损害。

3. 爆轰性能

1) 传爆速度

导爆管传播的是爆轰波，管壁炸药的爆轰波的速度即导爆管传爆速度。普通导爆管有两种型号，在常温(+25℃)条件下对应的传爆速度大至为1950m/s或1650m/s。

2) 引爆感度

导爆管只有在一定强度和适当形式的外界激发冲量作用下才能激起爆轰。

热冲量对导爆管的作用不能在管中实现稳定传播的爆轰波，所以，导火索、黑火药和点火器等只产生热冲量(产生火焰但不产生冲击波)的器材不能起爆导爆管。其他一切能使导爆管内产生冲击波的激发冲量均有可能起爆导爆管。雷管、导爆索、炸药包、电火花等都能起爆导爆管。

导爆管的起爆分轴向起爆和侧向起爆两种。轴向起爆通常用电火花或火帽冲能在导爆管端部内腔中直接起爆混合药粉。这种起爆比较直接，其起爆概率主要与激发强度和药粉感度有关。侧向起爆通常用雷管、导爆索等外界激发冲量先作用在导爆管外侧，再通过塑料管壁后方去起爆管内装药。这种起爆比较间接，其起爆概率除与激发强度和药粉感度有关外，还与管壁条件和连接条件有关。采用雷管侧向起爆导爆管时，用簇联法能使8号雷管同时起爆8根以上导爆管。

加强连接件的强度或捆扎的强度，有利于提高雷管爆炸产生的高速冲击载荷对导爆管的作用，使起爆概率提高。

3) 传爆性能

导爆管的传爆距离不受限制，6000m长的导爆管起爆后可一直传爆到底，爆速不会因传播距离的增长而变化。

环境的湿度和真空度对导爆管的传爆没有影响。导爆管的打结对导爆管的传爆有影响。打结后的导爆管的爆速将降低，而且在打结处管壁容易产生破裂。若有两个或两个以上的死结，导爆管将会产生拒爆。导爆管的中心孔被堵塞时也会产生拒爆。若导爆管内的药粉分布不匀而堆集成药节时，则可能把导爆管炸裂或炸断。

导爆管管壁的破损，如破洞、裂口等，都会影响导爆管的传爆，致使爆速降低，当破洞直径或裂口长度大于导爆管内径时，就会产生拒爆现象。导爆管中渗入异物时，也会影响传爆。为防止异物的侵入，可用火焰烧熔导爆管端口，然后用手捏合封闭。

4) 耐火性能

导爆管受火焰作用不会起爆，明火点燃导爆管一端后能平稳地燃烧，没有炸药粒子的爆炸声，但能在火焰中见到许多亮点。

5）耐静电性能

导爆管在电压30kV、电容330μF、长度极短(10cm)的条件下作用1min不起爆。这说明导爆管具有很好的耐静电性能。

6）抗撞击性能

质量为10kg重锤，落高150cm，侧向撞击导爆管时，导爆管不会起爆。汽车碾压只能使导爆管破损而不起爆，但步枪、机枪射击时，导爆管有时会起爆，即低速撞击一般不会使导爆管起爆，而高速冲击就有可能使导爆管起爆。

7）高低温性能

导爆管在+50℃、−40℃条件下能够正常起爆，可靠传爆。温度升高时导爆管的管壁变软，爆速下降。

8）抗拉强度

导爆管的抗拉强度在+25℃时不低于70N，+50℃时不低于50N，−40℃时不低于100N。尽管导爆管具有一定的抗拉强度，在敷设导爆管网路时，还是应尽量避免使导爆管受力。导爆管受力被拉细时，管内的药层将断开，药层断开的距离愈大对导爆管的传爆愈不利。

近些年，人们又研制出了高强度塑料复合导爆管(图6－17)。具有良好的抗静电、抗杂散电流性能，使用安全、简单、可靠，是普通塑料导爆管的传递更新换代产品。高强度导爆管性能如下：爆速(1950±50)m/s；25℃时，抗拉强度为196N；0＃柴油50℃下，浸7天后，能可靠传爆；50℃条件下，浸4天后，可靠传爆乳化油炸药；−30～80℃条件下可靠传爆；受意外拉伸后，其延伸率不大于100%时，仍能可靠传爆。另外，在延期时间上引用了全新的设计理念，使延时精度明显高于普通毫秒导爆管。



图6－17　高强度导爆管



# 6.2 电力起爆法

电力起爆法是利用电能起爆电雷管使装药爆炸的一种方法。该种起爆方法可以实现远距离上的装药，即能远距离起爆，比较安全。并且一次可以在确定的时刻准确地同时或逐次(采用延期电雷管)起爆多个装药。但所需器材多，需要对起爆网路进行设计和验算，且作业比较复杂。

## 6.2.1　电力起爆器材

实施电力起爆所需的器材有电雷管、检测仪表、导电线和电源。

1. 电雷管

电雷管性能参数是检验雷管质量、计算电爆网路、选用起爆电源和量测仪表的原始依据，主要性能参数有电阻，最大安全电流，发火电流，发火冲能，桥丝熔断冲能，发火时

间，传导时间，爆发时间，起爆能力等。

1）电雷管电阻

通常所说的电雷管电阻指桥丝电阻和脚线电阻的总和，又称为全电阻。它是设计电爆网路的基本参数。敷设网路前，要逐个测定每个雷管的电阻，检查有无断路、短路，或电阻特大、特小的雷管，并选出电阻值相近的雷管来使用，以保证可靠起爆。在电起爆网路设计时，同一电爆网路中的电雷管应选择同厂、同批、同型号的产品，尽量选用电阻值相差小的雷管。康铜桥丝电雷管的电阻差值不得超过 0.3Ω，镍铬桥丝电雷管的电阻值差不得超过 0.8Ω。

2）最大安全电流

通电时间不加限制，不会引爆任何一个雷管的最大电流称为最大安全电流。该定义是纯理论性的，实际测定是在一定的时间内(5min)，给电雷管输入恒定的直流电，电雷管都不产生爆炸的最大电流值。电雷管的最大安全电流是选定电雷管参数测量仪表的重要依据，也是衡量电雷管能抵抗多大杂散电流的依据。

国产雷管的最大安全电流：康铜丝为 0.3A，镍铬丝为 0.125A。

《爆破安全规程》规定在杂散电流大于 30mA 的工作面或高压线射频电源安全允许距离之内，不应采用普通电雷管起爆；电爆网路的导通和电阻值检查，应使用爆破专用的导通器和电桥，专用爆破电桥的工作电流应小于 30mA。

3）最小发火电流

给电雷管输入恒定的直流电，能将桥丝加热到点燃引火药的最小电流强度，称为电雷管的最小发火电流。国产电雷管的最小发火电流不大于 0.7A。若通电电流小于最小发火电流，即使通电时间很长，也难以保证可靠引爆雷管。因此，最小发火电流是通电时间不加限制引爆单个雷管所需要的最小准爆电流。

4）电雷管的爆炸作用时间

电雷管从通电开始至雷管爆炸所需要的时间称为雷管的爆炸时间。它包括两部分：电雷管的发火时间(即电雷管从通电开始至雷管桥丝发热引燃引火头上的引火药止所需时间，用 $t_i$表示)与传导时间(即从引火药发火至雷管爆炸为止所需时间 $t_c$)。

保证电雷管串联准爆的条件为

$$t_{i\min}+t_{c\min}\geqslant t_{i\max} \tag{6-1}$$

式中，$t_{i\min}$、$t_{c\min}$——感度最高雷管的发火时间和传导时间；

$t_{i\max}$——感度最低雷管的发火时间。

5）电雷管的发火冲能

引燃雷管所需要的电能用发火冲能($K$)来表示。根据焦耳-楞次(Joule - Lenz)定律，发火冲能定义为：雷管在发火时间内，每欧姆桥丝提供的热能。若通过雷管的电流为 $i$，发火时间为 $t_i$，则电流为交流电时的发火冲能为

$$K_i=\int_0^t I^2\mathrm{d}t \tag{6-2}$$

电流为直流电时的发火冲能可写成

$$K_I=I^2t_i \tag{6-3}$$

发火冲能 $K$ 与电流强度有关，因为电流强度小则相对来说热损失就大，这样所需的

发火冲能也大。热损失与很多因素有关，在发火的结构和材料固定后，发火冲能随电流的增大而减小，最后趋于一个定值——最小发火冲能 $K_0$。最小发火冲能的倒数称为电雷管的感度 $S$，即

$$S=\frac{1}{K_0} \tag{6-4}$$

6）桥丝熔断冲能

与发火冲能类似，桥丝熔断冲能 $K_m$ 定义为

$$K_m=I^2 t_m \tag{6-5}$$

式中，$t_m$——从通电到桥丝熔断的时间。

熔断冲能同样与电流强度有关。电流强度愈大，熔断冲能愈小。但电流强度增大到一定值后，熔断冲能将趋于定值，不再减小。该值称为最小熔断冲能。

为保证雷管可靠引燃，无论通入雷管的电流多大，熔断冲能都必须大于发火冲能。否则，在雷管发火前，桥丝将先被熔断。桥丝熔断后电流中断，虽然靠桥丝放出余热或断开桥丝间产生的电弧仍有可能引燃雷管，但不可靠。

2. 检测仪表

用专用型欧姆表来测量电雷管、导电线及电爆网路的电阻，其测量范围为 0.2～5000Ω。

3. 导电线

导电线有双芯塑料绝缘线和橡皮绝缘线两种。双芯塑料绝缘线的电阻为 0.1Ω/m；橡皮绝缘线又分单芯和双芯两种，单芯电阻为 0.025Ω/m，双芯电阻为 0.05Ω/m。

缺乏导电线时，也可用电话线或电灯线代用，其电阻值可用欧姆表测定。

导电线在使用前，必须检查其有无断路和短路，在水中或潮湿的地点使用时，还要检查其外皮的绝缘性是否良好。

4. 起爆电源

实施电起爆时，常用的起爆电源有起爆器和干电池，有时也用蓄电池、照明线路、动力线路和移动发电站等。

1）起爆器

常用的起爆器型号较多，如 GBP410 型起爆器、GBP411 型起爆器、GBP412 型起爆器、GBP413 型起爆器等。

2）干电池

干电池是一种化学能电源，操作简单，可以连接使用。但该种电源寿命不长，使用期限短，现在已很少采用。

3）蓄电池

汽车、摩托车和工程机械等所用的蓄电池也是化学能电源。单个电池的额定电压有 6V、12V 和 24V 这 3 种。其输出电流为 5～20A 不等。其内电阻很小，电点火时可忽略不计。

蓄电池在使用前应进行检查，只要蓄电池能够启动相应的车辆、机械，即证明其具有良好的点火能力。

同干电池一样，当单个蓄电池的电流和电压不能满足电点火线路需要时，可将若干数量的蓄电池串联、并联或混联使用。

4）照明、动力线路和移动发电站

这种电源的输出电压和电流强度均较大，大规模的并联或混联电点火起爆网路经常采用。只要线路所需要的电压和电流强度不超过其额定值，即能可靠点火。

使用照明、动力线路时，事先应了解线路的供电和负荷情况，以便进行线路计算。如有必要，在点火时应将其他负荷切断。

点火前，应预先敷设好电点火线路。禁止把干线直接接到照明、动力和发电站线路上去点火，必须接以闸刀开关，直到电点火线路全部敷设结束和导通后，才能将干线接在闸刀开关上。接到点火命令后，才能闭合闸刀开关。

## 6.2.2 电力起爆网路

由电雷管和导电线按一定的形式构成的电点火线路叫做电力起爆网路。电源通向装药所在位置的导电线称为干线，各电雷管之间及电雷管与干线之间的导电线称为支线。

1. 电力起爆网路的种类及其特点

电力起爆网路有串联、并联和混联 3 种连接形式(图 6－18)。在实际应用中，主要根据爆破任务及电源情况选定。其特点如下。

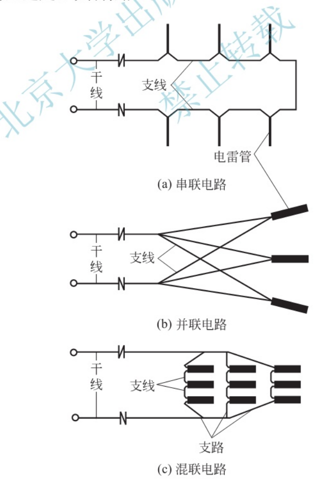





图 6－18 电力起爆网路连接形式

(1) 串联网路敷设和检查作业简便迅速，适合电压高但输出电流小的电源(如点火机)点火；如电雷管的电阻或感度不均匀，通电后电阻大或感度高的电雷管先爆炸，可能炸断线路，使其余的电雷管拒爆。

(2) 并联网路的一个支路的电雷管先爆或拒爆时，不影响其他支路点火。但所需总电流强度较大，适用于输出电流较大、电压较低的电源点火，且每条支路的电阻应相等，否则电阻大的支路电流将减小，可能发生拒爆。

(3) 混联网路适合用电压和电流均较大的电源点火。在爆破重要目标时，为了保证所有装药准确起爆，常用此种线路。采用这种线路时，各支路的电阻必须相等或相近。

2. 电爆网路的计算

在敷设电点火线路以前，应先进行网路计算。通常计算线路的总电阻，确定线路所需的电流强度(表6-7)，再根据电阻和电流强度算出电压，并根据计算结果选定电源。

表6-7 电点火起爆网路所需电流强度

| 电流 | 直流电/A | | 交流电/A | | 附注 |
|---|---|---|---|---|---|
| 雷管种类 / 线路形式 | 康铜 | 镍铬 | 康铜 | 镍铬 | |
| 串联 | 2.0 | 1.0 | 3.0 | 1.5 | $n$为支路数 |
| 并联(单发) | 1.0×$n$ | 0.6×$n$ | 1.5×$n$ | 0.9×$n$ | |
| 混联 | 2.0×$n$ | 1.0×$n$ | 3.0×$n$ | 1.5×$n$ | |

使用康铜桥丝电雷管的串联线路，雷管之间电阻差应不大于0.3Ω；使用镍铬桥丝电雷管的串联线路可不考虑电阻差；不同厂家、不同规格、不同型号、不同批次、不同桥丝的电雷管不得在同一网路中使用。网路的计算方法如下。

1) 串联网路

$$线路总电阻(R)：R=R_1+R_2+mr \quad (6-6)$$

式中，$R_1$——干线电阻，Ω；

$R_2$——支线电阻，Ω；

$r$——每个电雷管的电阻，Ω；

$m$——电雷管个数。

所需电流强度($I$)：查表6-7。

所需电压($U$)：$U=IR$。

**【例题1】** 有一串联电爆网路，已知干线往返全长500m，支线全长100m，导电线电阻为0.025Ω/m，串联20个康铜桥丝电雷管，每个电雷管的电阻为1.7Ω。试求该线路所需电压。如果改用镍铬桥丝电雷管，每个电雷管的电阻为3Ω，线路所需电压是多少?

**【解答】** 康铜桥丝电雷管

$$R=R_1+R_2+mr=0.025\times500\times+0.025\times100+1.7\times20=49(\Omega)$$

查表6-7，得 $I=2A$。

$$U=IR=2\times49=98V$$

镍铬桥丝电雷管

$$R=R_1+R_2+mr=0.025\times500\times+0.025\times100+3\times20=75(\Omega)$$

查表 6-7，得 $I=1A$。

$$U=IR=1\times75=75(V)$$

2）并联网路

线路总电阻($R$)

$$R=R_1+\frac{R_2+r}{n} \tag{6-7}$$

式中，$n$——支路数量。

所需电流强度($I$)：查表 6-7。

所需电压($U$)：$U=IR$。

**【例题 2】** 电爆网路由往返全长 200m 的干线及 10 条支路组成。每一支路由 20m 的导电线及 1 个康铜桥丝电雷管组成，导电线电阻为 0.025Ω/m，每个电雷管的电阻为 1.7Ω，试求线路所需直流电压。如改用镍铬桥丝电雷管，每个电雷管的电阻为 3Ω，线路所需电压是多少?

**【解答】** 康铜桥丝电雷管

$$R=R_1+\frac{R_2+r}{n}=0.025\times200+\frac{0.025\times20+1.7}{10}=5.22(\Omega)$$

查表 6-7，得 $I=1\times n=1\times10=10A$

$$U=IR=10\times5.22=52.2(V)$$

镍铬桥丝电雷管

$$R=R_1+\frac{R_2+r}{n}=0.025\times200+\frac{0.025\times20+3}{10}=5.35(\Omega)$$

查表 6-7，得 $I=0.6\times n=0.6\times10=6(A)$。

$$U=IR=6\times5.35=32.1(V)$$



3）混联线路

$$\text{线路总电阻}(R)\text{：}R=R_1+\frac{R_1+m_0r}{n} \tag{6-8}$$

式中，$m_0$——每一条支路上串联的电雷管个数。

所需电流强度($I$)：查表 6-7。

所需电压($U$)：$U=IR$。

**【例题 3】** 有一混联起爆网路，干线往返全长 600m，支路 4 条，每条支路由长 100m 的导电线(电阻为 0.025Ω/m)和 10 个串联的镍铬桥丝电雷管(每个电阻 2.55Ω)组成，求线路所需电压。

**【解答】** $R=R_1+\frac{R_2+m_0r}{n}=0.025\times600+\frac{0.025\times100+2.55\times10}{4}=22(\Omega)$

查表 6-7，得 $I=1\times n=1\times4=4(A)$

$$U=IR=4\times22=88(V)\text{。}$$

3. 线路的接续

线路的接续包括导电线互相接续及导电线与电雷管的连接。接续方法如下。

1）直线形接续法

导线与导线相接时，接续前先将两根导电线末端的绝缘体各剥去 5cm，并刮亮但勿伤

芯线，然后将两根芯线交叉放置，紧密地拧在一起，并缠上胶布。

导电线与电雷管脚线接续时，接续前先将电雷管脚线的绝缘体剥去 5cm，导电线的绝缘体剥去 2cm，并刮亮芯线，再将脚线在导电线上缠绕一周，用铁丝钳在导电线芯线 1/2 处弯曲压紧，然后再将脚线紧密地缠在导电线的芯线上，最后缠上胶布。

2）直角形接续法

剥去导电线绝缘体(长度与直线形接续法相同)并刮亮芯线，再将两根芯线成直角紧密缠绕，然后缠上胶布。若线路敷设在潮湿地区和水中，接续部位除缠上胶布外，还应涂以沥青或防潮剂。

### 4. 线路的敷设

敷设电点火线路时，作业的组织应按作业量的大小、人员和时间等情况而定。电雷管连接小组：领取电雷管，检查其导电是否良好，有时还要对电雷管的电阻加以选择，然后根据装药配置的情况连接电雷管和支线。电雷管连接完毕，与干线接通。

点火站小组负责领取、检查电源及检测仪表；接收干线小组敷设好的干线末端，并加以绝缘。当线路较多时，应加牌编号以防混乱，并派专人看守。线路敷设完毕后，检查线路是否良好，此时，所有人员均应撤到安全地点。线路检查后，如不立即点火，应将干线末端重新绝缘。

### 5. 敷设电点火线路的注意事项

(1) 线路敷设不能过紧，所有干线、支线均应增加 10%左右的松弛度。

(2) 敷设地下装药的电点火线路时，导电线应采取保护措施(如套入细钢管或木制、竹制保护槽中)，以防填塞时损坏导电线。

### 6. 敷设电点火线路的安全措施

(1) 电源开关要派专人看守。点火机转柄(或点火钥匙)应由指挥员掌握，待人员已撤到安全地带，指挥员发出点火准备口令之前，方可将点火机转柄发给起爆员。

(2) 严禁将电点火线路与照明线路、动力线路混设在一起。

(3) 敷设线路时，如无特殊措施，距离变电站、高压线、发电站及无线电发射台等目标的距离不得小于 200m。

**小知识**

#### 电点火线路的防雷电措施

有雷电时，电点火线路可能发生感应电流，使电雷管爆炸而引起装药意外爆炸。在野外条件下，当雷电直接击中导电线或炸药时，则很难避免装药的意外爆炸。为了预防线路附近发生雷电及静电感应或电磁感应时的电流影响，可采取下列措施。

(1) 全部线路埋入土中，深度不小于 25cm。

(2) 电点火线路应尽可能使用双芯导电线。如用单芯导电线时，则在敷设前应将两根线扭在一起，或用细绳、胶布每隔 1～1.5m 捆扎一道。

(3) 用一根裸线(可用有刺铁丝)与点火线路的导电线并排敷设。

(4) 点火站干线的末端分开放置，并进行绝缘。

(5) 尽可能避免支线并联，因为支线并联能形成闭合回路，因而会引起感应电流。

# 6.3 非电起爆法

## 6.3.1 导爆索起爆法

导爆索起爆法是利用导爆索传递爆轰并起爆装药的一种方法。其起爆过程是先利用点火管或电雷管起爆导爆索，然后依靠导爆索爆轰产生的能量在瞬间传(起)爆多个装药。

1. 导爆索的起爆

导爆索通常采用火雷管或电雷管起爆，为了保证起爆的可靠性，在硐室和深孔爆破时常在导爆索与雷管的连接处加 1～2 个炸药卷，雷管的集中穴应朝向传爆方向，雷管或药卷绑结的位置需离开导爆索末端 100mm。为了安全，只准在临起爆前将起爆雷管绑结于导爆索上。一个雷管能起爆 6 根导爆索；当导爆索超过 6 根时，可将导爆索捆在药块上，然后用点火管或电雷管起爆药块。导爆索与火雷管、电雷管或药块的连接部位，应用胶布或细绳扎紧，如图 6-19 所示。



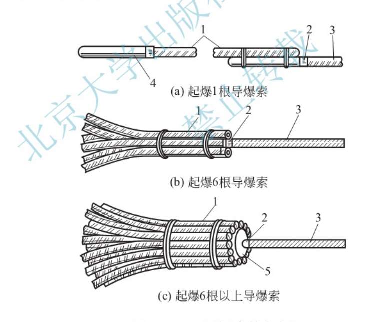



**图 6-19　导爆索的起爆**

1—导爆索；2—火雷管；3—导火索；4—插入装药的火雷管；
5—圆柱形药块

2. 导爆索网路的连接

导爆索连接方式可分为串联、分段并联、并簇联以及继爆管同导爆索组成的联合起爆网络。

1）串联

在每个药包之间直接用传爆线连接起来。此法当一个药包拒爆时，影响到后面的药包也拒爆，因此很少采用。

2）分段并联

将连接每个药包的每段传爆线与另外一根传爆线(主线)连接起来。这种连接起爆较可靠，因而在爆破中应用较多。

3）并簇联

将连接每个药包的传爆线一端连成一捆，再与另外一根传爆线(主线)连接起来，如图 6－20。这种连接传爆线消耗量很大。因此，只有在药包集中在一起时(如隧道爆破)应用。

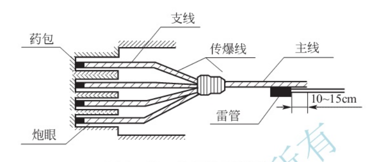



图 6－20　传爆线的并簇联

4）联合起爆网路

继爆管同导爆索联合起爆网络适用于露天、地下(无瓦斯爆炸危险)多排深孔延时爆破。有关爆破网路的连接方式如图 6－21、图 6－22、图 6－23 所示。



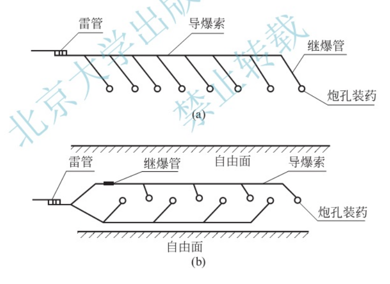



图 6－21　单排孔孔间延时爆破网路

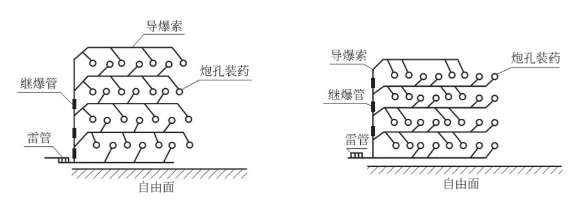



图 6－22　排中间隔延时爆破

图 6－23　排间对孔间隔延时爆破




导爆索的接续：导爆索需要接长时，可将两根导爆索的一端并在一起，用细绳或胶布捆扎起来，接续的长度应不小于 15cm；也可用对钩结接续。如果将支路上的导爆索接到干线上，可用云雀结接续。对钩结和云雀结的结扣要抽紧，以防松脱而影响可靠传爆。接法如图 6－24 所示。

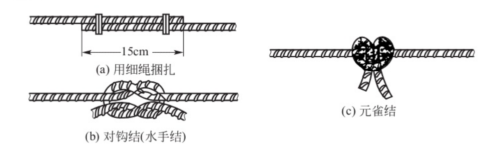



**图 6－24　导爆索的接续**

支线与主线连接时，支线的端头必须朝着主线起爆方向，其间的夹角不得小于 90°，如图 6－25 所示；在药包内(或起爆体内)，传爆线的一端应卷绕成起爆束，如图 6－26 所示，以增加起爆能力。

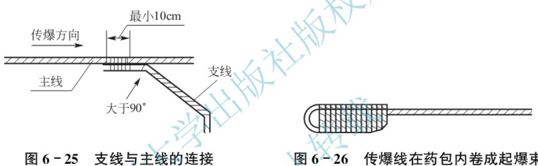



**图 6－25　支线与主线的连接**　　**图 6－26　传爆线在药包内卷成起爆束**



起爆传爆线用的火雷管应捆扎在距传爆线端头 10～15cm 处，雷管底部的窝槽应指向传爆方向。

3. 敷设导爆索起爆网路的注意事项和安全措施

1）注意事项

（1）在潮湿天气或水中使用导爆索时，其末端必须用胶布缠紧并浸以防潮剂。

（2）为了使串联或混联的所有装药可靠起爆，应使网路闭合起来。

（3）用点火管(或电雷管)同时起爆数根导爆索时，各导爆索的传爆方向要一致，否则与传爆方向相反的导爆索可能被炸断(图 6－27)而中断传爆。

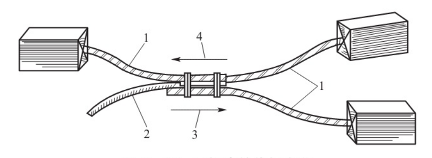



**图 6－27　导爆索的传爆方向**

1—导爆索；2—点火管；3—正确方向；4—反(错误)方向

（4）网路中的导爆索不要互相接触，也不要与相邻的装药接触；不要过分拉紧，也不

要形成环圈。

2）安全措施

（1）切取导爆索时，应先将整卷的导爆索展开一部分，使截取处到未展开处的长度不小于 10m。

（2）导爆索不应在烈日下长时间暴晒，经烈日暴晒过的导爆索不得收回库存。

导爆索起爆法的优点是操作技术简单、安全性较高，可以使成组装药的深孔或硐室同时起爆，导爆索的爆速高，可以提高弱性炸药的爆速和传爆的可靠性；缺点是导爆索价格较高，不能用仪表检查起爆网路的质量。

### 6.3.2　导爆管起爆法

1. 导爆管起爆系统组成元件

以导爆管为主体传爆元件的起爆系统称为导爆管起爆系统。它主要由激发元件、传爆元件、起爆元件和连接元件组成。

1）激发元件

激发元件的作用是起爆导爆管，使之产生爆轰波。主要有 3 种类型。

（1）工业雷管。可采用各种雷管来起爆导爆管(通常把这种起传爆作用的雷管称为传爆雷管，而把炮孔中起爆装药的雷管称为起爆雷管)。

（2）火帽和激发枪。激发枪可用体育发令枪改装(图 6－28)，枪身装有一个直径约为 3.2mm 的 L 型金属传火管，管的上部带有火帽台，管口可插入一根导爆管。当激发枪的台锤打击(或其他形式的机械作用)火帽时，火帽产生的冲击火焰可轴向起爆插入传火管中的导爆管。

（3）电火花激发装置。该装置使插入导爆管内的两个金属电极在强电场的作用下产生火花放电，从而轴向起爆导爆管。

激发笔(图 6－29)与起爆器配套使用就是一种电火花激发装置。笔尖是放电元件，由直径 1.17mm 的管状外层电极和直径 0.63mm 的针状内层电极组成，两极中间用绝缘介质封固。使用时将激发笔的笔尖插入导爆管内，将激发笔的导线接在起爆器的接线柱上，充电后按起爆按钮即可起爆导爆管。

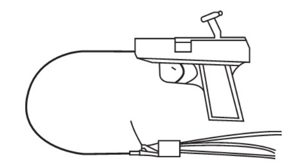


图 6－28　激发枪起爆导爆管

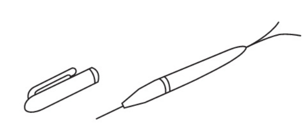


图 6－29　激发笔结构示意图

此外，导爆管还可用导爆索、炸药装药及强力引火头等激发。

2）传爆元件

传爆元件的使用是将冲击波信号由激发元件传给各个起爆元件。传爆元件由导爆管或

导爆管与雷管组成。传爆雷管可用各种瞬发或延期雷管(含导爆雷管)，后者对网路起延时作用。

3）起爆元件

起爆元件的作用是起爆装药。按爆破网路的不同要求，起爆元件可用 8 号瞬发雷管或延期雷管，目前已有瞬发、毫秒(ms)、半秒(hs)和秒(s)延期导爆管雷管供作起爆元件用。

4）连接元件

连接元件起连接作用，用来连接激发元件、传爆元件和起爆元件，主要有卡口塞、连接块和传爆接头等。

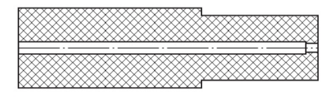


图 6－30　塑料卡口塞结构示意图

(1) 卡口塞(图 6－30)用来组合连接导爆管和火雷管(有时称此种雷管为组合雷管)。

(2) 连接块(图 6－31)用于固定雷管和被它侧向起爆的多根导爆管。连接块有多种形式，中央有一插雷管用的圆孔，圆孔周边有多个小孔用以插入导爆管。

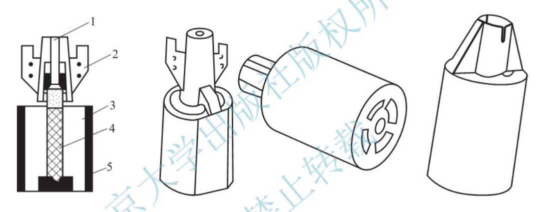





图 6－31　连接块结构示意图

1—导爆管；2—扁平翼；3—导爆管接孔；
4—雷管；5—管壁

(3) 传爆接头也称连通管，用于导爆管之间的连接。这种连接在传爆网络中没有雷管，安全性好。它利用导爆管断药 20cm 左右仍能传递冲击波的特性，将爆轰信号直接传递给后续导爆管。图 6－32 是几种主要传爆接头的结构。

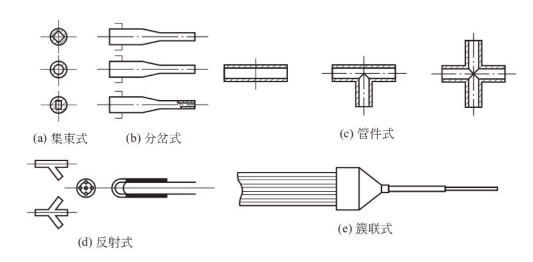



图 6－32　轴向传爆接头

在没有制式连接元件或不能使用连接元件时，可采用工程雷管进行简易连接，即把一根或多根甚至数十根的导爆管均匀地捆在雷管的周围，利用雷管对导爆管的侧向起爆作用传递爆轰。捆扎物可用聚丙烯包扎带、细绳、雷管脚线和胶布等。捆扎的强度愈大，起爆的可靠性愈高。其中聚丙烯带的捆扎效果较好，雷管外侧均匀排列的三层导爆管均能被起爆(30～40 根)，胶布的捆扎效果较差，通常只能起爆 8 根导爆管。

2. 导爆管起爆系统

1）导爆管起爆系统工作过程

激发笔或雷管爆炸引发导爆管起爆和立即传爆，当传爆到连接元件的连通管时，经过连通管的过渡(无延误时间)，使往下的导爆管起爆和传爆。连通管所连接的导爆管有两种，其一是属于连接工作元件末端工作元件的导爆管，由于它的传爆引起末端工作元件的非电雷管起爆，结果使炮孔(药包)中的炸药被引爆；其二是属于连接工作元件的导爆管，它的作用是传爆到下一个连通管。就这样接连地传爆下去，使所有的炮孔或药包按一定的延期时间间隔起爆。

2）基本起爆网路

塑料导爆管起爆系统问世之前，进行延时爆破时广泛采取电爆。但电爆网路的设计与计算以及准备工作比较麻烦，费工费时，在有杂散电流的药室中，以及遇到雷电时，容易出现意外的早爆事故。塑料导爆管非电系统的诞生，不但避免电爆有可能出现的意外早爆事故，而且完全能代替电爆进行延时爆破，并比电爆更具有优越性。导爆管非电起爆进行延时爆破时，需要的毫秒雷管段别少，却能进行大规模的延时爆破，不受炮孔或药包数量限制，这是电爆无可比拟的。实践证明，导爆管非电起爆网路铺设操作简便、准爆可靠、起爆器材费用低廉。

导爆管起爆系统的网路设计时，通常用符号表示(如图 6－33所示)。

(a) 炮孔
(b) 激发装置(起爆端)
(c) 同段起爆的炮孔
(d) 组合雷管
(e) 装入炮孔中的组合雷管
(f) 表示组合雷管通过连接元件与多根塑料导爆管连接
(g) 塑料导爆管通过三通传爆接头连接
(h) 塑料导爆管通过四通传爆接头连接

**图 6－33　网路符号说明及图例**

导爆管非电起爆网路有以下几种式样。

(1) 簇联网路。簇联网路如同电爆的并联网路一样，把炮孔或药包中非电毫秒雷管用一根导爆管延伸出来，然后把数根延伸出来的导爆管用连通管或传爆雷管并在一起，如图 6－34 所示。

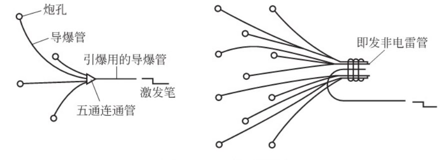



**图 6－34　簇联网路**

簇联法在深孔松动控制爆破和硐室松动控制爆破中，作为毫秒延时起爆网路中的一个主要环节较多地被采用，例如，把从几个炮孔或几个药包中引出的导爆管绑扎在孔(洞)外雷管的四周，然后再把孔(洞)外雷管串联在一起，这种网路形式在各类控制爆破工程中经常用到。

(2) 串联网路。对于深孔松动控制爆破，当进行排间起爆时，即同一排的炮孔安放同一段别的毫秒雷管，不同排安放不同段别雷管，每排炮孔连接常采取串联，如图 6－35 所示。当采取孔(洞)外延时起爆时，把几个炮孔或几个药包分成一组，在孔(洞)外把每一组从炮孔(药包)中引出导爆管绑扎在一定段别毫秒雷管上，然后把孔(洞)外已绑扎好的毫秒雷管串联在一起。

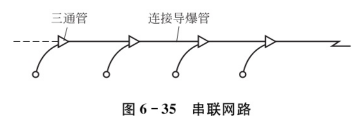



**图 6－35　串联网路**

(3) 并串联网路。并联网路与串联网路的结合组成并串网路，如图 6－36 所示。并串联网路是深孔松动控制爆破和硐室松动控制爆破起爆网路中最基本的，以此为基础可以构成如图 6－37 所示的并串串联网路、图 6－38 所示的并串并联网路。

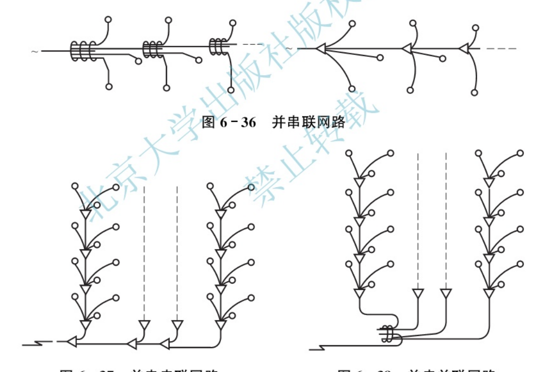


**图 6－36　并串联网路**

**图 6－37　并串串联网路**　　**图 6－38　并串并联网路**



(4) 复式网路。为了确保起爆网路的准爆可靠，除了铺设网路时认真细致外，为防止个别雷管或导爆管拒爆，在深孔松动控制爆破和硐室爆破中，实际采取导爆管非电起爆时，在每个药包中安放两个非电雷管，相应地从炮孔或药包中引出两根导爆管，孔(洞)外连接的连通管或传爆雷管也需要两个，这样就把单式并串联网路变成复式并串联网路。

复式起爆网路有以下两种形式。

① 普通复式起爆网路。图 6－39 所示复式爆破网路的特点是两条传爆干线之间没有相互作用。这种网路的传爆可靠性比单式网路大得多。

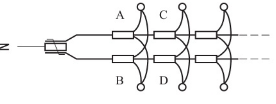



**图 6－39　普通复式爆破混联网路**

网路中两条传爆干线间有一定的距离，以防止网路同时遭受某一因素影响造成的破坏。

图中 A、B 为爆破网路中第一段传爆雷管，C、D 为第二段传爆雷管。爆破网路开始工作后，A、B 传爆雷管起爆该段的传爆支线及下一段传爆干线，使该段炮孔的起爆雷管和下段传爆雷管 C、D 点火。当某种因素影响使 A 拒爆时，则由 B 的作用仍然能够使第一段起爆雷管和第二段传爆雷管正常起爆。同样，B 拒爆时，A 仍作用。从图中还可以看出，与 B 组合的导爆管在 A 以前被切断时，还可以通过 A 的作用起爆 B。

② 加强复式起爆网路。加强复式起爆网路虽然也为两套单式爆破网路的组合，但网路中两条传爆干线相互作用，每一条传爆支线均受到传爆干线中两个传爆雷管的作用。这种加强复式起爆网路如图 6-40 所示。

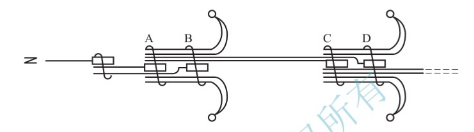



**图 6-40 加强复式起爆网路**

这种类型的爆破网路使传爆干线之间可以互相作用，而且网路中的支线使起爆次数增加，从而使整个爆破网路传爆的可靠性大大提高。

3. 导爆管非电起爆注意事项

塑料导爆管起爆系统与其他方法相比虽然具有安全可靠、使用方便和易于推广等优点，但这种新型起爆器材在爆破工程施工中应用才十多年，人们对它的认识有待加深，掌握使用有待完善。为确保安全准爆，防止意外事故出现，避免出现瞎炮、断路等毛病，除了应按该起爆器材使用说明外，还应注意以下问题。

1）端头密封

导爆管按使用所需的长度截断后，为使下一次使用正常起爆和传爆，截断后的端头一定要密封，以防止受潮、进水或其他小颗粒物体进入管中。用蜡烛或火柴烧熔导爆管端头，然后用手捏紧即可。再使用时，把端头部位切去 10cm 左右的长度不要，其余长度可继续使用。

2）防止过度拉伸

导爆管虽然打结、弯曲或轻微拉伸均不影响起爆传爆，但是过度拉长导爆管使其变细到小于 0.3mm 时，传爆就不可靠了，所以，在使用时尽量不要拉伸。

3）外观检查

导爆管、非电雷管在使用必须细致地检查外观。凡导爆管破损、折断和压扁的，均应剪去不要，然后用套管对接牢。非电雷管与导爆管连接处(卡口塞)如松动，应作为废品处理，不应使用，否则起爆不可靠。

4）瓦斯地段禁用

导爆管在传爆过程中，由于导爆管质量和连通管的不密封性，火焰有可能喷射出来，所以在有瓦斯的条件下，绝对禁止使用导爆管起爆系统。

5）连接雷管的安置

采用传爆雷管作为连接元件，或孔(洞)外绑扎的毫秒雷管，簇联导爆管时雷管的聚能

穴应背向导爆管的传爆方向，如图 6－41 所示。这样安置，雷管的聚能射流不会把从炮孔或药包中引出的导爆管过早炸断，保证导爆管正常传爆。此外，从炮孔或药包中引出的导爆管簇联在雷管周围时，应留有约 10cm 的余长。

6）网路不能采取环形传爆

由于导爆管传爆的延时作用，或孔(洞)外串联的毫秒雷管，不像电爆那样，一合上闸电流立即流到各个炮孔或药包中，所以在设计导爆管非电起爆网路时，不能采取环形传爆形式，即传爆的初始位置与终了位置不能相隔过近，否则，初始位置的爆破会把终了位置的导爆管打断，以致造成部分炮孔或药包拒爆。图 6－42 所示的对称传爆形式，可以避免环形传爆所出现的不良现象。

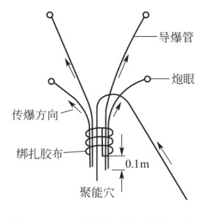



**图 6－41　簇联雷管安置方向**

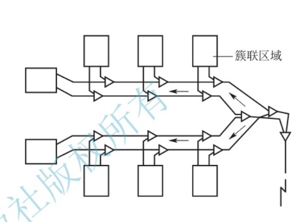



**图 6－42　对称传爆网路**

7）当心孔(洞)外连接的雷管

对于孔(洞)外等间隔延时和同段位高段别延时爆破网路，由于孔(洞)外串联了多个毫秒雷管，如果一旦因种种原因触响，后果不堪设想。只要在思想上认识到这个问题的严重性及危害性，行动上予以重视、认真仔细，肯定不会出现意外。针对这个问题采取的相应措施是：网路连接人员要精少；从起爆方向的最终点倒着连线到起爆网路的开始端；孔(洞)外连接好的雷管要有明显的标志；最后检查网路是否连接完好时，要先抬头看，后迈步走。

## 6.4 其他起爆方法

除了上述几种常用的起爆方法以外，近年来国内外还研制和发展了多种新型起爆方法，它们各具特点，在不同条件下有其应用前景。

### 6.4.1 气体起爆法

气体起爆法(Hercudet 起爆系统)由美国大力神公司发明，目前已开始少量使用。该系统是利用空心塑料管内可爆性气体的爆轰来传递起爆能量的，所以称为气体起爆系统。全系统由贮气箱、发爆器、塑料输气管(内径约 1.5mm)连接块和带有两根塑料管的气体起爆雷管等组成的。图 6－43 为气体起爆系统示意图。

在准备阶段，贮气箱内的可燃气体自动按比例(60% $O_2$、20% $H_2$、20% $CH_4$)输入发爆器的混合点火装置内，混合成为爆炸性气体，注入塑料输气管中，直接与装入炮孔的气

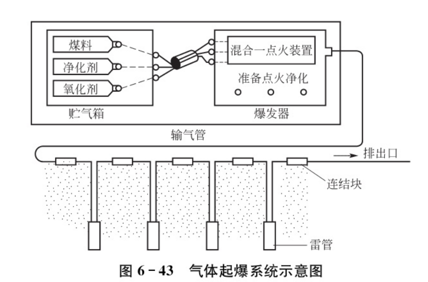



图 6-43 气体起爆系统示意图

爆雷管连通。起爆时，按点火开关，产生电火花，爆炸性气体以 3000m/s 的速度传爆，引爆雷管，进而起爆炸药。毫秒延期时间仍是利用雷管中的延期药来实现。为了清洗和检查管路，贮气管内备有净化用的惰性气体(氮气)。

气体起爆法是另一类型的非电起爆新方法。其优点是管路可通入惰性气体进行检查；在爆炸性混合气体未注入管路之前，整套管路处于惰性状态，无引爆危险；不受电的干扰，对炮孔内的装药不产生任何影响；气体传爆可靠稳定，不产生爆声；操作简单等。其缺点是装置复杂；管路易被污染和填塞。



## 6.4.2 磁电起爆法

为了吸取电力起爆法的优点，同时又要克服杂散电流的危害，国内外已研制成功了磁电起爆法。

磁电起爆法网路包括由 QB—1 型起爆器、无接头磁环电雷管等组成磁电起爆系统，并配备专用 HZ—1 型网路检测仪。我国已于 1986 年 9 月在江西大吉山钨矿试用成功。该系统如图 6-44 所示。

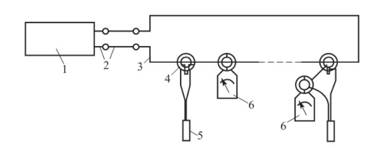



图 6-44 磁电起爆系统示意图

1—QB—1 型起爆器；2—一次线；3—导线；4—磁环；
5—电雷管；6—HZ—1 型检测仪

在电磁起爆系统中，电雷管脚线是全封闭没有接头的。生产电雷管时，就将脚线缠绕在全封闭的磁环上，故外部电流不可能从脚线输入。起爆时由 QB—1 型起爆器供给固定频率的交流电信号，经磁环产生感应电流引爆电雷管，不接收外界其他任何电信号，所以有较好的抗杂电效果。

网路检查系统是由信号发生器和无触点检测仪(HZ—1 型)组成，可迅速检查出网路中

接触不良或断头情况。我国研制的磁电起爆系统性能已可与国外的相比，一次起爆雷管量达200多发，脚线长达10m；检测系统安全可靠，预期将有广泛前景。

### 6.4.3 无线电遥控起爆系统

无线电遥控起爆系统多用于水下爆破等特殊条件下，主要有超声波遥控起爆和电磁波遥控起爆两种。前者为日本首先应用于水下爆破的起爆。该系统由指令装置发出超声波信号，使起爆电容放电，进而使电雷管通电起爆。信号采用调频波，频率为25kHz±500Hz，调制频率范围为380～420Hz，可在100m水深以内使用。

电磁波遥控起爆，则是由振荡器、环形天线、接收器和雷管组成，输出功率20kW，接收器按调谐频率而同时齐发，在1ms内即可动作。

## 本章小结

本章集中介绍了起爆器材及起爆方法。现将其中的要点归纳如下。

(1) 导火索起爆方法、电起爆方法、导爆索起爆方法、导爆管起爆方法概念。

(2) 各起爆方法所用的器材。

(3) 各起爆方法的线路敷设。

(4) 各起爆方法的优缺点及应用。

(5) 新型起爆器材及起爆方法。



## 习题

**一、名词解释**

雷管，导爆索，继爆管，导火索，导爆管，电力起爆法，电力起爆网路，导火索起爆法，导爆索起爆法

**二、填空题**

1. 常用的起爆器材包括________、________、________、________、________和________。

2. 爆破工程中常用的工业雷管有__________、__________和__________。

3. 实施电力起爆所需的器材有__________、__________、__________和__________。

4. 电力起爆网路有__________、__________和__________3种连接形式。

5. 非电起爆法主要有__________、__________和__________3种形式。

**三、简答题**

1. 导爆索有何特点？使用时应注意哪些事项？

2. 试说明导爆管的传爆原理。

3. 常用的起爆方法有哪几种？试述各种起爆方法的所用的器材、使用原理、优缺点。

4. 导爆索起爆网路的连接方式有哪几种？各应注意哪些事项？